

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES Y
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS ENTRE MEZCLA
ASFÁLTICA EN CALIENTE "AUTORREPARABLE"(CON LANA
DE ACERO) Y MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
CONVENCIONAL

NOMBRES:

JOSUÉ MARTÍN FIALLOS BRAVO
LUIS GUILLERMO UNDA CÓRDOVA

DIRECTOR: ING. GUSTAVO YÁNEZ

QUITO, ABRIL 2018

RESUMEN

La construcción de carreteras en el Ecuador durante los últimos años brinda la posibilidad de buscar nuevas opciones para mejorar la calidad de los pavimentos, es por eso que a través de la presente disertación de grado se intenta mostrar el uso y optimización de materiales para la auto reparación del pavimento, con la adición de lana de acero a la mezcla en caliente convencional, algo que ya es objeto de estudio en el extranjero, pero aplicado a pavimentos porosos.

Gracias a la adición de este material a la mezcla se planea reducir la disgregación de materiales pétreos de la capa de rodadura en el pavimento, el cuál es un problema presente en las vías del país, aumentando así su vida útil, lo que podría reducir costos y tiempo de mantenimiento. A través de calor por inducción se puede calentar las fibras de la lana de acero y juntar nuevamente a los agregados de la mezcla, lastimosamente no contamos con esta tecnología en el país por lo que se decidió utilizar los hornos disponibles para la auto reparación de las probetas ensayadas.

En la práctica, las mezclas convencional y modificada con lana de acero son diseñadas con el método Marshall. El método Marshall brinda como resultado valores de estabilidad y flujo de ambas mezclas, siendo estos los parámetros mecánicos que servirán como indicadores para la comparación entre las dos mezclas experimentales realizadas en esta disertación.

ABSTRACT

The construction of roads in Ecuador during the last years offers the possibility of looking for new options to improve the quality of the pavements, that is why through the present dissertation it is tried to show the use and optimization of materials for the self-healing of the pavement, with the addition of steel wool to the conventional hot mix, something that is already under study abroad but applied to porous pavements.

Due to the addition of this material to the mixture, it is planned to reduce the disintegration of the aggregates from the pavement layer, which is a problem present in the roads of the country, increasing its useful life, which could reduce costs and maintenance time. Through induction heating, the steel wool fibers can be heated and the aggregates of the mixture can be put back together by melting the asphalt; unfortunately, we do not have this technology in the country, so it was decided to use the ovens available for self-repair of the test specimens tested.

In practice, conventional and modified steel wool hot mixes are designed with the Marshall method. The Marshall Method results in stability and flow values of both mixtures, these being the mechanical parameters that will serve as indicators for the comparison between the two experimental mixtures designed in this dissertation.

DEDICATORIA

A Dios, por su ayuda y sustento a lo largo de toda mi vida, sin su presencia en mi vida, nada de esto hubiera sido posible.

A mis padres, Santiago y Amalia, por su amor y sacrificio para que a lo largo de mi carrera no me falta nada y pueda dar lo mejor de mí.

-Martín Fiallos

A Dios, por las bendiciones recibidas, que me permiten culminar esta etapa consiguiendo este importante logro

A mis padres, Luis y Sylvia, por todo el esfuerzo y sacrificio que hacen día a día para permitirme cumplir mis metas.

A mi hermana, Mane, para que este objetivo cumplido sirva como ejemplo en su vida profesional y la inspire a superarse.

A mi querida Ñaña Pepy, mi pilar, mi ángel que mirará desde el cielo la meta que ella inspiró y ayudó a lograr.

Finalmente, a toda mi familia por ser un importante apoyo durante la carrera.

-Luis Guillermo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la salud y por su ayuda para superar cada dificultad que se ha presentado en el camino, lo que ha hecho posible que pueda alcanzar este objetivo. Agradezco a mis padres, por siempre poner mis necesidades por encima de las suyas, por su amor incondicional y por darme el ejemplo para ser mejor cada día.

Agradezco a mis familiares y amigos que han sido de fundamental ayuda y han aportado para que pueda culminar esta etapa de mi vida.

Finalmente, gracias a mi amigo Luis, por su esfuerzo y dedicación que permitieron sacar adelante esta investigación

-Martín Fiallos.

Agradezco a Dios por su compañía durante todo el camino seguido hasta el cumplimiento de esta meta, a mis padres por ser el pilar fundamental en mi vida, por su amor, apoyo, paciencia y comprensión, además de su inconmensurable esfuerzo diario y su ejemplo como profesionales y personas de bien; a toda mi familia por su soporte.

Además también quiero agradecer a mis profesores por todo el conocimiento y valores compartidos en las aulas, a mi compañero y amigo Martín por permitirme formar parte de esta disertación y por todo su apoyo en el proceso.

Finalmente a todo el personal del Laboratorio de Materiales de Construcción de la PUCE, por la ayuda y apoyo brindados para que esta disertación salga adelante.

-Luis Guillermo

Tabla de contenido

1.	CAPÍTULO 1.....	11
1.1.	INTRODUCCIÓN.....	11
1.2.	OBJETIVOS.....	12
1.3.	MARCO TEÓRICO	12
1.3.1.	PAVIMENTO FLEXIBLE.....	12
1.3.2.	AGREGADOS PÉTREOS.....	13
1.3.3.	AGREGADO GRUESO.....	13
1.3.4.	AGREGADO FINO.....	13
1.3.5.	FILLER O RELLENADOR.....	13
1.3.6.	MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL	13
1.3.7.	MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POROSA.....	14
1.3.8.	MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE “AUTO REPARABLE”	15
2.	CAPITULO 2.....	16
2.1.	ENSAYOS A LOS AGREGADOS: DESCRIPCIÓN Y CÁLCULOS.....	16
2.1.1.	EQUIVALENTE DE ARENA PARA AGREGADO FINO. (ASTM D2419-14)	17
2.1.2.	GRAVEDAD ESPECÍFICA. AGREGADO GRUESO (ASTM C127-15). AGREGADO FINO (ASTM C128-15).....	18
2.1.3.	EVALUACIÓN DE LA DUREZA DE AGREGADOS, FINO Y GRUESO, ANTE LA ACCIÓN DE SULFATOS. (ASTM C88-13)	19
2.1.4.	RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO SOMETIDO A ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES. (ASTM C131/C131M – 14).....	20
2.2.	ENSAYOS AL BITUMEN: DESCRIPCION Y CALCULOS	22
2.2.1.	VISCOSIDAD ABSOLUTA (ASTM D2171 / D2171M - 10).....	23
2.2.2.	VISCOSIDAD CINEMÁTICA (ASTM D2170 / D2170M - 10).....	24
2.2.3.	PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN (ASTM D92-16B)	25
2.2.4.	GRAVEDAD ESPECÍFICA (ASTM D70-17)	26
2.2.5.	ÍNDICE DE PENETRACIÓN (ASTM D5 / D5M-13).....	27
2.2.6.	PUNTO DE ABLANDAMIENTO (ASTMD36/D36M-14E1)	28
2.2.7.	CAMBIO DE MASA (ASTM D2872-12E1).....	28
2.2.8.	DUCTILIDAD (ASTM D113-17)	29
3.	CAPÍTULO 3.....	31
3.1.	DISEÑO SEGÚN MÉTODO MARSHALL	31

3.1.1.	ALCANCE	33
3.1.2.	PREPARACION DE LA MEZCLA.....	33
3.1.2.1.	PREPARACION DE LOS AGREGADOS.....	33
3.1.2.2.	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN 34	
3.1.2.3.	MEZCLA EN LABORATORIO.....	35
3.1.2.4.	COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS	36
3.1.2.5.	DETERMINACION DE GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK	39
3.2.	ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MÉTODO MARSHALL	39
3.3.	ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA MAXIMA TEORICA Y LA DENSIDAD DE MEZCLAS DE PAVIMENTO BITUMINOSAS 41	
3.4.	ESTABILIDAD Y FLUJO.....	43
3.4.1.	ESTABILIDAD MARSHALL	43
3.4.2.	VALOR DE FLUJO MARSHALL	43
3.5.	PROPIEDADES VOLUMETRICAS DE LA MEZCLA	43
3.5.1.	VACIOS	43
3.5.2.	VTM VACIOS TOTALES EN LA MEZCLA	43
3.5.3.	VFA VACIOS LLENOS DE ASFALTO.....	44
3.5.4.	VMA VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL	44
3.6.	CÁLCULOS MEZCLA EN CALIENTE CONVENCIONAL	44
3.7.	CÁLCULOS MEZCLA EN CALIENTE MODIFICADA CON LANA DE ACERO “AUTO REPARABLE”	50
3.8.	MEDIDA DE FLUJO Y ESTABILIDAD EN PROBETAS DE MEZCLA COMÚN Y PROBETAS DE MEZCLA MODIFICADA POST REPARACIÓN	57
4.	CAPÍTULO 4.....	62
4.1.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS ENTRE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL Y LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA	62
4.2.	ANÁLISIS DE COSTO ADICIONAL EN LA MEZCLA MODIFICADA CON LANA DE ACERO.....	63
4.3.	PROCESO DE REPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA MODFICADA CON LANA DE ACERO EN LAS VÍAS	65
5.	CAPÍTULO 5.....	66
5.1.	CONCLUSIONES	66
5.2.	RECOMENDACIONES.....	67

6. BIBLIOGRAFIA.....	68
7. ANEXOS.....	71

Índice de fotografías

Foto 1.1: Especímenes elaborados con mezcla asfáltica en caliente convencional	14
Foto 1.2: Especímenes elaborados con mezcla en caliente porosa	14
Foto 1.3: Espécimen elaborado con mezcla asfáltica en caliente con lana de acero	15
Foto 1.4: Fibras de lana de acero	16
Foto 2.1: Equipo necesario para realización del ensayo de Equivalente de Arena	18
Foto 2.2: Canastilla usada para sumergir el agregado grueso	19
Foto 2.3: Solución de Sulfato de Sodio usada en la disertación	20
Foto 2.4: Máquina de abrasión de Los Ángeles	21
Foto 2.5: Esferas de acero para la máquina de Los Ángeles	21
Foto 2.6: Equipo usado para ensayo de Viscosidad Absoluta a 60°C	24
Foto 2.7: Equipo usado para determinación de Viscosidad Cinemática a 135 °C	25
Foto 2.8: Copa abierta de Cleveland y equipo usado para el ensayo de punto de inflamación	26
Foto 2.9: Picnómetro usado para determinación de densidad relativa	27
Foto 2.10: Equipo usado para ensayo de penetración.....	27
Foto 2.11: Equipo usado para el ensayo de punto de ablandamiento	28
Foto 2.12: Horno giratorio usado para el ensayo de cambio de masa.....	29
Foto 2.13: Botellas con película de pared delgada (RTFO)	29
Foto 2.14: Muestras estandarizadas para ensayo de ductilidad	30
Foto 2.15: Equipo usado para ensayo de ductilidad	30
Foto 3.1: Equipo usado para tamizar agregado grueso	33
Foto 3.2: Equipo usado para tamizar agregado fino	34
Foto 3.3: Horno usado para calentar el asfalto	34
Foto 3.4: Mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio para una briqueta.....	35

Foto 3.5: Equipo graficador usado para medición de flujo y estabilidad Marshall	41
Foto 3.6: Equipo usado para la determinación de Gravedad Específica Máxima de la mezcla asfáltica	42
Foto 3.7: Discos elaborados para medición de flujo y estabilidad	57
Foto 3.8: Discos de mezcla asfáltica modificada con 4% de lana de acero previo a la rotura	58
Foto 3.9: Rotura de los discos de mezcla asfáltica modificada con lana de acero	58
Foto 3.10: Discos rotos de mezcla asfáltica modificada con lana de acero	59
Foto 3.11: Discos de mezcla modificada con lana de acero post recuperación	59
Foto 3.12: Ensayo de flujo y estabilidad Marshall de los discos de mezcla asfáltica.....	60
Foto 4.1: Presentación comercial de la lana de acero	63

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Resumen de resultados de ensayos de caracterización de los agregados	22
Tabla 2.2: Requisitos para el cemento asfáltico AC-20	23
Tabla 2.3: Resumen de resultados de ensayos de caracterización del cemento asfáltico AC-20	31
Tabla 3.1: Mezcla de agregados fino y grueso con respecto a la especificación MOP	44
Tabla 3.2: Cantidad de material retenido en cada tamiz necesario para la elaboración de una briqueta	46
Tabla 3.3: Pesos, volumen y densidades de cada briqueta de mezcla asfáltica en caliente convencional	47
Tabla 3.4: Vacíos en la mezcla asfáltica en caliente convencional.....	47
Tabla 3.5: Valores de Estabilidad y Flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente convencional	48
Tabla 3.6: Pesos, volumen y densidades de cada briqueta de mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero	52
Tabla 3.7: Vacíos en la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero.....	53
Tabla 3.8: Valores de Estabilidad y Flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero	54

Tabla 3.9: Medidas de flujo y estabilidad Marshall en los discos	61
Tabla 4.1: Requisitos para Mezcla Asfáltica	62
Tabla 4.2: Resumen de propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas	63
Tabla 4.3: Aumento de costo por adición de lana de acero en la mezcla asfáltica	64

Índice de Gráficas

Gráfica 2.1: Ubicación de la cantera de agregados fino y grueso	17
Gráfica 2.2: Ubicación de la Planta Industrial IMPTEK	22
Gráfica 3.1: Forma de realizar las medidas de estabilidad y flujo	32
Gráfica 3.2: Molde estandarizado para compactación de briquetas	37
Gráfica 3.3: Martillo de compactación estandarizado	38
Gráfica 3.4: Cabezal estandarizado para ensayo de flujo y estabilidad Marshall	40
Gráfica 3.5: Curva granulométrica de la mezcla de agregados	45
Gráfica 3.6: Representación los resultados de la mezcla asfáltica en caliente convencional por porcentajes de asfalto	49
Gráfica 3.7: Representación los resultados de la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero, por porcentajes de acero respecto al bitumen	55
Gráfica 3.8: Flujo y estabilidad de los discos de mezcla asfáltica	61
Gráfica 4.1: Proceso de auto-reparación en vías	65

Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1: Equivalente de arena	17
Ecuación 2.2: Gravedad específica del agregado grueso	18
Ecuación 2.3: Gravedad específica del agregado fino	19
Ecuación 2.4: Desgaste de los agregados	20
Ecuación 2.5: Degradación de los agregados	21
Ecuación 2.6: Viscosidad absoluta de materiales bituminosos	23
Ecuación 2.7: Viscosidad cinemática de materiales bituminosos	24
Ecuación 2.8: Corrección de punto de inflamación y combustión	25
Ecuación 2.9: Gravedad específica de materiales bituminosos	26

Ecuación 2.10: Porcentaje de cambio de masa RTFO	28
Ecuación 3.1: Porcentaje de asfalto teórico necesario para la mezcla en caliente.....	45

Índice de Anexos

Informe de resultados del ensayo de Durabilidad de los áridos a la acción de los sulfatos 71	
Informe de resultados del ensayo de Abrasión e impacto por la máquina de Los Ángeles 72	
Informe de resultados del ensayo de Gravedad específica en el agregado fino	73
Informe de resultados del ensayo de Gravedad específica en el agregado grueso	74
Informe de resultados del ensayo de Equivalente de Arena.....	75
Informe de resultados del ensayo de Viscosidad Absoluta (1 de 2)	76
Informe de resultados del ensayo de Viscosidad Absoluta (2 de 2)	77
Informe de resultados del ensayo de Viscosidad Cinemática.....	78
Informe de resultados del ensayo de Punto de chispa y llama	79
Informe de resultados del ensayo de Densidad de materiales bituminosos	80
Informe de resultados del ensayo de Penetración de Materiales bituminosos	81
Informe de resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento	82
Informe de resultados del ensayo de Cambio de masa (RTFO).....	83
Informe de resultados del ensayo de Ductilidad de Materiales Bituminosos	84

1. CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

El mal estado de las vías de pavimento flexible en el país, evidenciado especialmente en el perímetro urbano de la capital se debe al desgaste en la capa de rodadura debido al escaso o nulo mantenimiento que se les realiza durante su vida útil.

Según Quantao Liu (2012), desde que la vía empieza a funcionar, en el pavimento se presentan micro fisuras, las cuales son difíciles de detectar, causadas por el clima y el tráfico que circula por la misma, son el origen de las macro fisuras que de no ser tratadas generan problemas a largo plazo como baches y alteración en la estructura del pavimento, poniendo en peligro a los vehículos y comprometiendo la seguridad de los conductores.

Como una alternativa de solución a este problema se presenta el uso de mecanismos auto reparables a través de la adición de lana de acero a la mezcla asfáltica, estas fibras que se encuentran dispersas en el asfalto permiten que el asfalto se derrita por medio de la aplicación de calor por inducción y selle las micro fisuras, juntando nuevamente los agregados que se han separado o podrían separarse; evitando así los potenciales problemas descritos previamente.

La investigación realizada previamente en Holanda por el Dr. Erik Schlangen y profundizada por el Dr. Quantao Liu (2013), fue dirigida hacia el estudio de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente porosa con lana de acero, la mejora con respecto a la mezcla asfáltica porosa convencional se produjo en la resistencia a la pérdida de partículas, resistencia al daño por agua, rigidez, resistencia a la fatiga y módulo dinámico.

Por otro lado, la presente disertación se aplica al tipo de mezcla asfáltica en caliente usado en el país (no porosa) en donde se compara el flujo y estabilidad de la mezcla convencional con respecto a la mezcla asfáltica en caliente con lana de acero denominada auto reparable.

1.2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una mezcla asfáltica en caliente de pavimento flexible modificada con lana de acero, para realizarle ensayos de laboratorio que permitan compararla con una mezcla en caliente común.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de laboratorio para determinar las propiedades y características mecánicas de los materiales a usarse: agregados y bitumen, en las mezclas asfálticas convencional y modificada.
- Diseñar mezcla en caliente óptima del pavimento flexible, con la dosificación adecuada de agregados y asfalto, usando el método Marshall.
- Diseñar mezcla en caliente modificada con lana de acero, tomando como base la mezcla en caliente optima, a través del método Marshall.
- Determinar el porcentaje óptimo de lana de acero para la mezcla en caliente modificada.
- Realizar ensayos de laboratorio para obtener medidas de flujo y estabilidad de ambas mezclas en caliente, convencional y modificada con lana de acero, para comparación de resultados.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1. *PAVIMENTO FLEXIBLE.*

Se denomina flexible al Pavimento cuya estructura y dimensiones, está compuesta de materiales pétreos que permiten deformarse o flexionarse ante las cargas que transitan sobre él.

Los Pavimentos flexibles se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa (Carpeta Asfáltica), que se apoya sobre otras capas inferiores llamadas base y subbase; sin embargo es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la subrasante y de las necesidades de cada obra. (EcuRed, 2012)

1.3.2. AGREGADOS PÉTREOS.

Los materiales pétreos se obtienen a partir de las rocas. Estas rocas se encuentran como bloques, losetas, gránulos y fragmentos de distintos tamaños.

Los agregados pétreos tienen granulometría característica o necesaria para formar parte de la mezcla.

1.3.3. AGREGADO GRUESO.

Están compuestos fundamentalmente por gravas este tipo de áridos presentan tamaños comprendidos entre 60 y 5 mm y conforman el esqueleto mineral en cualquier tipo de mezcla bituminosa.

1.3.4. AGREGADO FINO.

Se corresponden con las arenas por lo que se excluyen aquellas partículas que no atraviesen el tamiz de 5 mm, generalmente se emplean como recebo del agregado grueso de forma que ocupen los huecos existentes para hacer la mezcla más compacta.

1.3.5. FILLER O RELLENADOR.

Se define como la fracción mineral que pasa por el tamiz 0.08 esta especie de polvillo fino se obtiene como un producto residual procedente de lavado de los agregados machacados. Dada su gran superficie específica desempeña un papel fundamental en las mezclas bituminosas mejorando sus propiedades reológicas (relación entre esfuerzo y deformación en un sólido).

1.3.6. MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL

Según la Asociación de Pavimento Asfáltico del estado de Michigan (APA-MI) (2008), se define a la mezcla en asfáltica en caliente como la combinación de aproximadamente 95% roca, arena y/o grava unida por un 5% de cemento asfáltico, producto derivado del crudo.

Según Padilla (2004) este tipo de mezcla es más utilizado que la mezcla asfáltica en frío, durante la fabricación de este tipo de mezclas se eleva los agregados y el bitumen a temperaturas cercanas a los 150 °C.

Foto 1.1: Especímenes elaborados con mezcla asfáltica en caliente convencional



Fuente: NAPA, 2007.

1.3.7. MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POROSA

Este tipo de mezcla asfáltica es una mezcla en caliente y se diferencia de la convencional porque la relación de vacíos mínima requerida para un buen desempeño es de 20%. Según la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico (NAPA) (2009) un buen desempeño de este tipo de pavimento se presenta cuando este capaz de drenar el agua a través de su superficie y evacuarla por medio de infiltración al suelo. Además, Mc Daniel & Thornton (2005) aseguran que la ventaja más importante del uso de la mezcla asfáltica porosa en vías es la reducción del ruido causado por la circulación de vehículos en 3-4 dB, comparado con el ruido que se produce en las vías con una mezcla no porosa.

Foto 1.2: Especímenes elaborados con mezcla en caliente porosa



Fuente: Liu, Q. (2012)

1.3.8. MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE “AUTO REPARABLE”

White (2001) define a la mezcla asfáltica en caliente auto reparable como aquella que tiene la capacidad intrínseca de reparar automáticamente el daño ocurrido durante su vida útil. De manera similar a otros materiales auto reparables, el concreto asfáltico puede repararse de manera autónoma. El concreto asfáltico por si solo tiene el potencial de restaurar su rigidez y fuerza al ser sometido a periodos de descanso bajo presión. Bazin & Saunier descubrieron que vigas elaboradas con concreto asfáltico y ensayadas hasta la rotura podían recuperar un pequeño porcentaje de su resistencia original, si estas se mantenían en reposo a 25 °C bajo presión.

La mezcla desarrollada, en la que se añada fibras de lana de acero, al momento de aumentar la temperatura por inducción, causa que estas fibras se calienten y derritan el bitumen lo que, junto con la aplicación de un esfuerzo de compresión, sellará las fisuras, restaurando así la unión entre agregados juntándolos con el cemento asfáltico.

Foto 1.3: Espécimen elaborado con mezcla asfáltica en caliente con lana de acero

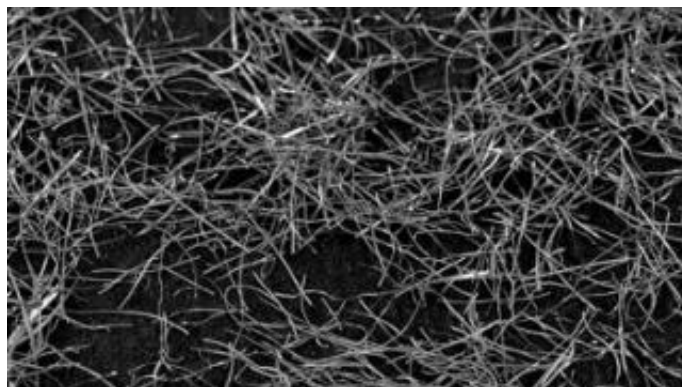


Según la publicación de la investigación “Influencia de la lana de acero en las propiedades mecánicas, térmicas y reparadoras de concreto asfáltico denso” (2014) liderada por Álvaro García; se reporta que la adición de fibras de lana de acero a la mezcla asfáltica convencional en un porcentaje máximo de 7 % con respecto al bitumen, produce una mejora en las propiedades de fuerza, fatiga, también se produce un incremento de la ductilidad y además puede producir una variación positiva en el módulo

dinámico de la mezcla, su deformación a largo plazo y su resistencia al contracción por congelamiento.

Estas fibras se deben encontrar bien distribuidas, ya que una mala distribución podría traer problemas de aumento en la porosidad de la mezcla, lo que conlleva a un deterioro de las propiedades mecánicas de la mezcla reduciendo su durabilidad. Para asegurar la buena distribución de las fibras en la mezcla, Manfred Partl (2013) recomienda que las fibras tengan una longitud máxima de 2mm.

Foto 1.4: Fibras de lana de acero



Fuente: Liu, Q. (2012)

2. CAPITULO 2

2.1. ENSAYOS A LOS AGREGADOS: DESCRIPCIÓN Y CÁLCULOS

Los agregados obtenidos para las mezclas asfálticas provienen de la zona de San Antonio de Pichincha, se decidió trabajar con una mezcla de dos materiales: agregado fino y agregado grueso. Se eligió trabajar con el agregado de esta zona conociendo de antemano que este material es de baja calidad, y generalmente los materiales usados en las vías del país no son de una calidad muy diferente a este, por lo que al realizar la mezcla con un material de baja calidad y obtener buenos resultados gracias a la adición de lana de acero, quedará demostrada una mejora en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con materiales de esta calidad baja y los beneficios serán mayores si se usan mejores agregados.

Gráfica 2.1: Ubicación de la cantera de agregados fino y grueso



Fuente: Google. (2018).

2.1.1. EQUIVALENTE DE ARENA PARA AGREGADO FINO. (ASTM D2419-14)

El equivalente de arena es la medida de la cantidad de limo, arcilla, y polvo cuyo tamaño es menor a 0,002mm y que se encuentran adheridos al agregado fino.

El fin de este ensayo es determinar las proporciones relativas de finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasen el tamiz No. 4 (4,75mm). El término equivalente de arena expresa el concepto de que la mayoría de los suelos granulares están conformados por agregado grueso, agregado fino el cual contiene partículas plásticas finas y polvo no deseados.

Ecuación 2.1: Equivalente de arena

$$SE = \frac{SR}{CR} * 100$$

Donde:

SE = Equivalente de arena.

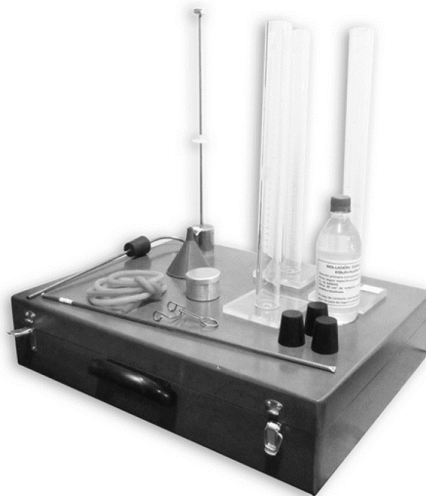
SR = Lectura de arena en centímetros (Material sedimentado).

CR = Lectura de arcilla en centímetros (Material en suspensión).

Se realizaron 2 ensayos simultáneamente para verificar que los valores obtenidos sean similares y que el ensayo fue realizado correctamente.

El valor promedio entre ambos ensayos será el valor del equivalente de arena del agregado fino.

Foto 2.1: Equipo necesario para realización del ensayo de Equivalente de Arena



Fuente: ASTM. (2014)

2.1.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA. AGREGADO GRUESO (ASTM C127-15).
AGREGADO FINO (ASTM C128-15).

La gravedad específica es la relación entre el peso que tiene el agregado en un determinado volumen sobre el peso que tiene el mismo volumen de agua.

Agregado grueso

Ecuación 2.2: Gravedad específica del agregado grueso

$$GS = \frac{A}{C - B}$$

Donde:

GS = Gravedad específica.

A = Masa seca de la muestra pesada en el aire (gr).

B = Masa de la muestra saturada sumergida en agua (gr).

C = Masa de la muestra saturada superficialmente seca (gr).

Foto 2.2: Canastilla usada para sumergir el agregado grueso



Agregado fino

Ecuación 2.3: Gravedad específica del agregado fino

$$GS = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

GS = Gravedad específica.

A = Masa seca de la muestra pesada en el aire (gr).

B = Masa del picnómetro con agua (gr).

C = Masa del picnómetro con agua y agregado fino (gr).

S = Masa del agregado saturado superficialmente seco (gr).

2.1.3. EVALUACIÓN DE LA DUREZA DE AGREGADOS, FINO Y GRUESO, ANTE LA ACCIÓN DE SULFATOS. (ASTM C88-13)

Este ensayo busca determinar la dureza de los agregados sometidos a cambios de temperatura. Esto se logra a través de un proceso repetitivo, en el cual se sumergen los agregados en sulfato de sodio o magnesio, seguido de un proceso de secado al horno, lo cual permite recrear la expansión y contracción que sufre una mezcla asfáltica cuando sufre cambios de temperatura.

Ecuación 2.4: Desgaste de los agregados

$$Dg(\%) = \frac{m_o}{m_f} \times 100$$

Donde:

Dg (%) = Porcentaje degradado o porcentaje de pérdida del material.

mo = masa inicial retenida en el tamiz (gr).

mf = masa final retenida en el tamiz después del ensayo (gr).

Foto 2.3: Solución de Sulfato de Sodio usada en la disertación



**2.1.4. RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO
SOMETIDO A ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES.
(ASTM C131/C131M – 14)**

Este ensayo permite medir la degradación de agregados minerales sometidos a acciones de abrasión, desgaste e impacto con un número determinado de esferas de acero contenidas en un tambor de acero giratorio.

Ecuación 2.5: Degradación de los agregados

$$Dg(\%) = \frac{m_o}{m_f} \times 100$$

Donde:

Dg (%) = Porcentaje degradado o porcentaje de pérdida del material.

mo = masa inicial retenida en el tamiz (gr).

mf = masa final retenida en el tamiz después del ensayo (gr).

Foto 2.4: Máquina de abrasión de Los Ángeles



Foto 2.5: Esferas de acero para la máquina de Los Ángeles



Tabla 2.1: Resumen de resultados de ensayos de caracterización de los agregados

CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS					
Ensayo	Norma	Resultado		Unidades	Significado
Equivalente de arena para agregado fino	ASTM D2419-14	SE = 20		%	SE : Equivalente de arena
Gravedad específica del agregado grueso	ASTM C127-15	SG = 2,45		----	SG : Gravedad Específica
Gravedad específica agregado fino	ASTM C128-15	SG = 2,45		----	SG : Gravedad Específica
Desgaste por impacto y abrasión	ASTM C131M-14	%D = 44		%	%D : Porcentaje desgastado
Desgaste por acción de sulfatos	ASTM C88-13	Tamices	%P	%	%P : Porcentaje perdido
		Agregado fino			
		4	68,20		
		8	28,47		
		16	22,6		
		30	16,02		
		50	10,59		
		Agregado grueso			
		3/4	53,23		
		1/2	82,11		
		3/8	82,41		
		4	57,54		

2.2. ENSAYOS AL BITUMEN: DESCRIPCION Y CALCULOS

El material bituminoso usado en esta tesis es el cemento asfáltico AC-20, obtenido en la planta de IMPTEK en la ciudad de Quito. Para ser usado en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente este material debe ser ensayado bajo las normas del país y cumplir con los parámetros que estas indican, las normas bajo las cuales se realizan estos ensayos son las INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y ASTM (American Society for Testing and Materials).

Gráfica 2.2: Ubicación de la Planta Industrial IMPTEK



Fuente: Google. (2018).

Los resultados obtenidos a través de los ensayos al cemento asfáltico deben cumplir con los requisitos de la norma INEN 2515 descritos a continuación.

Tabla 2.2: Requisitos para el cemento asfáltico AC-20

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, %	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^a		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^a , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916

Fuente: INEN 2515. (2010).

2.2.1. VISCOSIDAD ABSOLUTA (ASTM D2171 / D2171M - 10)

La viscosidad representa la resistencia al flujo en el viscosímetro que presenta el líquido, en este caso el asfalto AC-20 a la temperatura de ensayo. La viscosidad se presenta en unidades de Pa s. Este método solo es aplicable para materiales con viscosidades entre 0,0036 y 20000 Pa s.

Ecuación 2.6: Viscosidad absoluta de materiales bituminosos

$$V = K \cdot t$$

Donde:

K = factor de calibración de la máquina (Pa · s/s)

t = tiempo de flujo (s)

V= Viscosidad (Pa·s)

Foto 2.6: Equipo usado para ensayo de Viscosidad Absoluta a 60°C



2.2.2. VISCOSIDAD CINEMÁTICA (ASTM D2170 / D2170M - 10)

La norma rige el procedimiento del ensayo de viscosidad cinemática, a través de este procedimiento se calcula la viscosidad del asfalto a 135 °C. La viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad del líquido y su densidad, se representa en unidades de mm²/s por conveniencia para evitar el uso de notación científica en m²/s.

Ecuación 2.7: Viscosidad cinemática de materiales bituminosos

$$V = C \cdot t$$

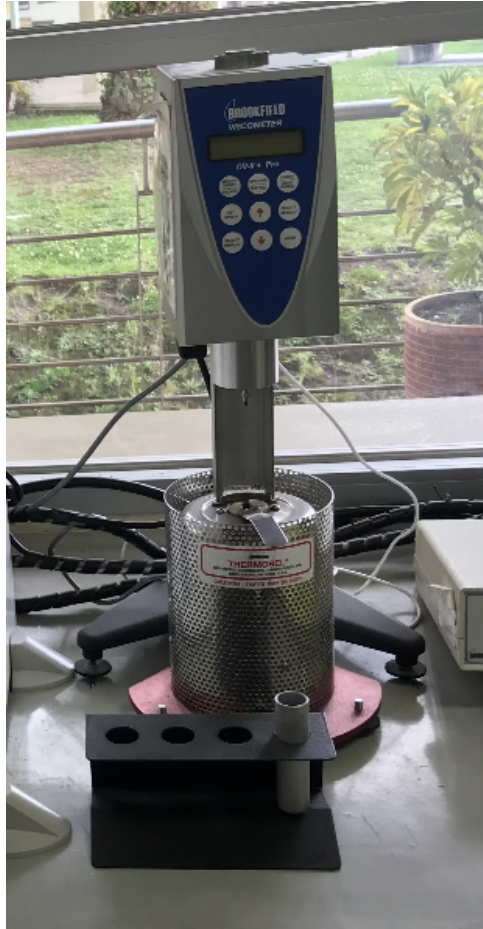
Donde:

C = constante de calibración del viscosímetro (mm²/s²)

t = tiempo de flujo (s)

V= Viscosidad cinemática (mm²/s)

Foto 2.7: Equipo usado para determinación de Viscosidad Cinemática a 135 °C



2.2.3. PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN (ASTM D92-16B)

Esta prueba al bitumen es útil ya que indica las temperaturas a la cual se producen destellos y combustión del asfalto, respectivamente. Los resultados obtenidos por este ensayo permiten conocer el nivel de riesgo ante un potencial fuego generado en el bitumen.

Este método es válido para materiales bituminosos con punto de chispa de 79°C y superiores, siendo el punto de llama una temperatura mayor al mencionado anteriormente.

Ecuación 2.8: Corrección de punto de inflamación y combustión

$$\text{Puntos de inflamación y combustión corregidos} = C + 0,033 (760 - P)$$

Donde:

C = Temperatura observada en °C

P = Presión Barométrica en mmHg

Foto 2.8: Copa abierta de Cleveland y equipo usado para el ensayo de punto de inflamación



2.2.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA (ASTM D70-17)

Se define a la gravedad específica de un material bituminoso como la relación entre la masa de un volumen de bitumen y la masa de un mismo volumen, pero de agua.

Ecuación 2.9: Gravedad específica de materiales bituminosos

$$\text{Densidad relativa} = (C - A) / [(B - A) - (D - C)]$$

$$\text{Densidad} = \text{Densidad relativa} \cdot W_T$$

Donde:

A = Masa del picnómetro con tapa secos

B = Masa del picnómetro lleno de agua

C = Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D = Masa del picnómetro con asfalto con agua

W_T = Densidad del agua a la temperatura de ensayo

Foto 2.9: Picnómetro usado para determinación de densidad relativa



2.2.5. ÍNDICE DE PENETRACIÓN (ASTM D5 / D5M-13)

El índice de penetración representa la consistencia del asfalto dependiendo de la distancia vertical penetrada por una aguja normalizada.

Foto 2.10: Equipo usado para ensayo de penetración



2.2.6. PUNTO DE ABLANDAMIENTO (ASTMD36/D36M-14E1)

El ensayo usado para el punto de ablandamiento o reblandecimiento es conocido también como el ensayo del método de anillo y bola, la utilidad de este ensayo es asegurar la uniformidad del asfalto durante su transporte, además de servir como indicador de su tendencia al flujo a altas temperaturas.

Foto 2.11: Equipo usado para el ensayo de punto de ablandamiento



2.2.7. CAMBIO DE MASA (ASTM D2872-12E1)

Este ensayo tiene como objetivo conocer los efectos que producen el aire y el calor en una película de pared delgada de asfalto en este caso. Además, permite conocer el cambio de masa que se produce en el bitumen al realizar la mezcla en caliente a 150 °C.

Ecuación 2.10: Porcentaje de cambio de masa RTFO

$$\% \text{ Cambio de masa} = [(A - D)/A] * 100$$

Donde:

A = Masa de la botella más asfalto antes de ingresar al horno (g)

D = Masa de la botella más asfalto después de ingresar al horno (g)

Foto 2.12: Horno giratorio usado para el ensayo de cambio de masa



Foto 2.13: Botellas con película de pared delgada (RTFO)



2.2.8. DUCTILIDAD (ASTM D113-17)

Gracias a este ensayo se adquiere una medida del comportamiento a tracción del material bituminoso, además de ser este el ensayo que rige la aprobación del material para su uso en la mezcla asfáltica. La ductilidad del bitumen es la propiedad del material para deformarse sin llegar a romperse.

Foto 2.14: Muestras estandarizadas para ensayo de ductilidad



Foto 2.15: Equipo usado para ensayo de ductilidad

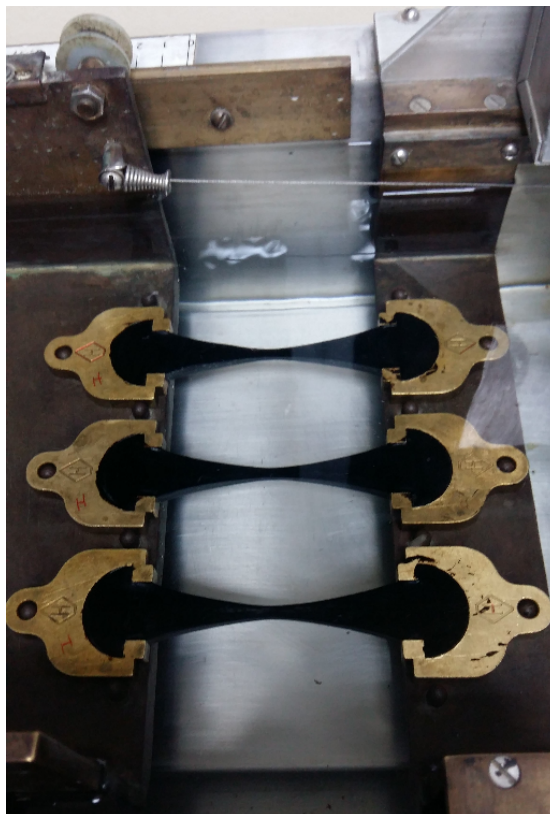


Tabla 2.3: Resumen de resultados de ensayos de caracterización del cemento asfáltico AC-20

CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO AC-20 PROVENIENTE DE IMPTEK						
ENSAYO	NORMATIVA	LÍMITES		UNIDADES	RESULTADO	CUMPLE
		MINIMO	MAXIMO			
Viscosidad Absoluta a 60 °C	ASTM D2171 / ASTM D2171M-10	160	240	Pa s	195,44	SI
Viscosidad Cinemática a 135 °C	ASTM D2170 / ASTM D2170M-10	300	...	mm ² /s	355	SI
Punto de Chispa con copa abieta de Cleveland	ASTM D92-16B	232	...	°C	301	SI
Punto de Llama con copa abieta de Cleveland	ASTM D92-16B	...	...	°C	323	SI
Densidad por método del picnómetro a 25 °C	ASTM D70-17	...	...	kg/m ³	1006,526	SI
Penetración a 25 °C	ASTM D5 / ASTM D5M-13	-1,5	1	...	-0,7	SI
Punto de ablandamiento método de anillo y bola	ASTM D36 / ASTM D36M-14E1	...	...	°C	48,5	SI
Cambio de masa RTFO	ASTM D2872-12E1	...	1	%	0,015	SI
Ductilidad a 25 °C	ASTM D113-17	50	...	cm	51	SI

3. CAPÍTULO 3

3.1. DISEÑO SEGÚN MÉTODO MARSHALL

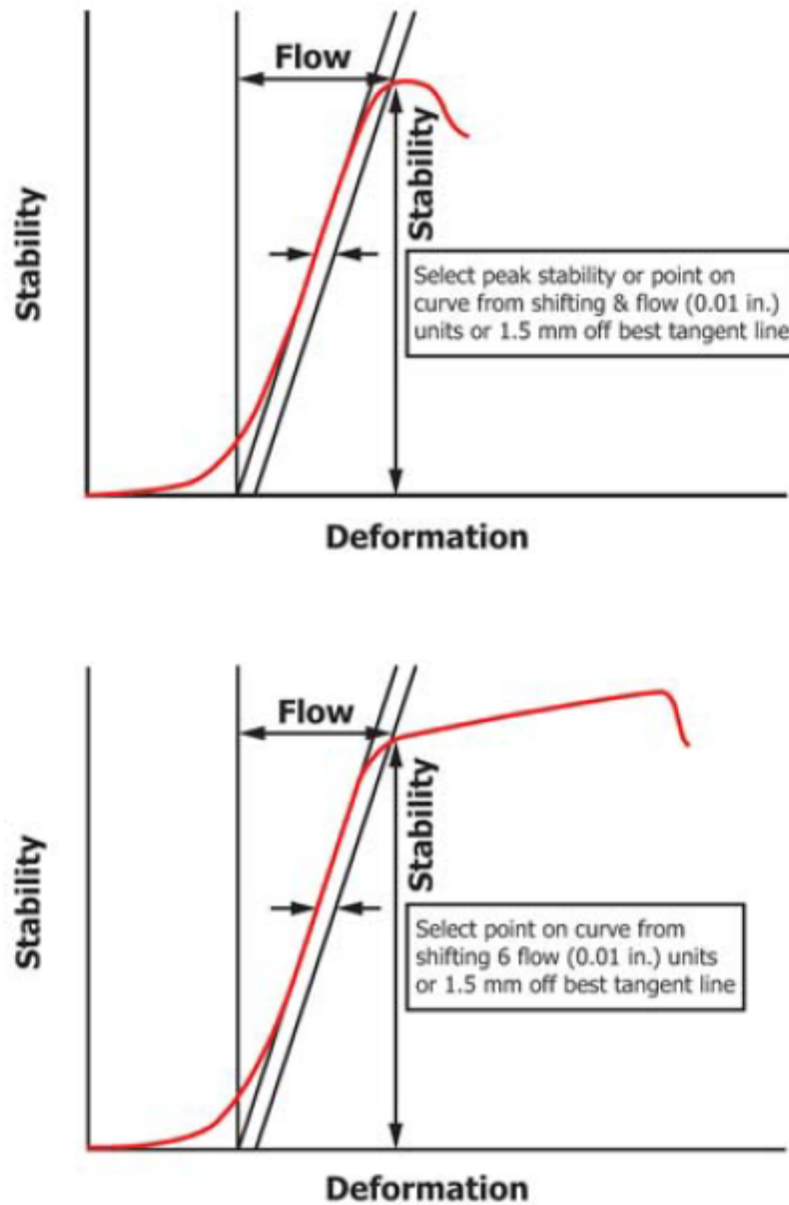
Los conceptos básicos del Método Marshall para mezclas asfálticas fueron desarrollados originalmente por Bruce Marshall, en el Departamento Vial de Mississippi alrededor de 1929. Según White (2001), el Método Marshall busca establecer el contenido óptimo de bitumen a una densidad deseada que satisfaga la Estabilidad Marshall mínima y el rango de valores de flujo.

Este procedimiento de ensayo es usado en el diseño y evaluación de mezclas asfálticas, este método de ensayo presenta dos características principales para el diseño de las mezclas: análisis de densidad y vacíos, y ensayo de estabilidad y flujo.

En esta disertación se utiliza el diseño de la mezcla según este método ya que es el más usado en Latinoamérica por la simpleza de sus equipos y su bajo costo, además de que permite la obtención de el porcentaje de asfalto óptimo de la mezcla de manera rápida y efectiva. Por otra parte, produce densidades cercanas a las densidades de campo. (Bhatti, 2017).

Es necesario tomar en cuenta que la investigación se realizó en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, donde se cuenta con los equipos necesarios para el diseño por el método Marshall.

Gráfica 3.1: Forma de realizar las medidas de estabilidad y flujo



Fuente: ASTM. (2016).

El procedimiento resumido de Diseño de la mezcla asfáltica según el Método Marshall es el siguiente:

1. Selección y caracterización de los agregados
2. Selección y caracterización del asfalto
3. Preparación de la mezcla y elaboración de las briquetas
4. Determinación de estabilidad y flujo
5. Cálculo de la densidad y vacíos
6. Selección del porcentaje óptimo de bitumen

A continuación, se detallará el procedimiento empleado en esta disertación siguiendo los lineamientos especificados por el Método Marshall para diseño de mezclas.

Se inició con los ensayos a los agregados y al bitumen, mencionados en el capítulo anterior, para poder contar con una completa descripción de las características necesarias para proceder con la preparación de la mezcla.

3.1.1. ALCANCE

El procedimiento descrito se encuentra normado por ASTM 6926-16, la cual especifica la preparación y compactación de cilindros con mezclas asfálticas, que tienen un diámetro nominal de 101,6 mm y 63,5 mm de altura, usando el Método Marshall, el procedimiento de ensayo descrito en la norma es aplicable para el uso en laboratorio y en planta para mezclas con un agregado de tamaño máximo de 1 pulgada (25,4 mm).

3.1.2. PREPARACION DE LA MEZCLA

3.1.2.1. PREPARACION DE LOS AGREGADOS

Para la preparación de la mezcla es necesario calentar en horno los agregados hasta obtener una masa constante, este secado debe ser realizado a una temperatura de 110 \pm 5 °C. Se debe dejar enfriar los agregados a temperatura ambiente para posteriormente tamizarlos por las mallas recomendadas para poder generar la mezcla de agregados fino y grueso.

Foto 3.1: Equipo usado para tamizar agregado grueso



Foto 3.2: Equipo usado para tamizar agregado fino



3.1.2.2. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN

El asfalto usado en la preparación de las muestras debe ser calentado en un rango de temperaturas recomendado por el proveedor o el fabricante, en caso de no contar con esta información o si se desea determinar en laboratorio la temperatura de mezcla, se debe elegir la temperatura a la cual el asfalto tiene una viscosidad de $0,17 \pm 0,02$ Pa s.

Foto 3.3: Horno usado para calentar el asfalto



3.1.2.3. MEZCLA EN LABORATORIO

La mezcla asfáltica puede ser preparada para elaborar una o hasta un máximo de cuatro briquetas; se pesan en diferentes recipientes la cantidad de agregado respectiva que pase por cada malla, esta cantidad debe ser suficiente para producir las briquetas mencionadas. En el caso de la presente disertación se realizó la mezcla por una briketa a la vez, con aproximadamente 1100 gr de mezcla de agregados, debido a que el proceso de mezclado se realizó de manera manual.

Para iniciar el proceso de mezcla, el agregado se haber sido colocado a una temperatura de hasta 28 °C superior a la temperatura de mezcla. Esta mezcla seca de agregado debe ser colocada en el recipiente de mezcla y homogenizada con una cuchara, formando un cráter sobre el cual se colocará el peso de asfalto necesario para elaborar el bache, que en caso de ser la primera mezcla será el obtenido de manera teórica y en caso de ser la mezcla modificada será el porcentaje de asfalto que produzca un porcentaje de vacíos en la mezcla del 4%. Durante el proceso de mezcla debe ser cuidadoso intentando evitar la pérdida de material. Según esta norma la mezcla debe tardar 60 segundos en ser completada, asegurándose que todas las partículas hayan sido cubiertas por el asfalto.

Foto 3.4: Mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio para una briketa



3.1.2.4. COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS

Todas las partes que conforman el molde para la compactación de la briqueta y la cara del martillo de compactación deben ser calentadas en un horno en un rango de temperaturas entre 90 a 150 °C, para asegurarse que la mezcla no pierda temperatura al momento de encontrarse en el molde para su compactación. Se debe colocar una pieza de papel absorbente en la base del molde previo a introducir la mezcla. Con la mezcla colocada en el molde, acomodarla por medio de 15 golpes en el perímetro y 10 golpes en el centro de la mezcla, después de realizar esto, colocar otro papel absorbente encima de la mezcla.

Colocar el molde ensamblado en el pedestal de compactación, colocando los seguros para evitar el movimiento durante al proceso, seguido de esto aplicar el número de golpes a cada lado del molde para formar la briqueta, la nota 4 de la norma ASTM D6927-16 indica que el número de golpes recomendado por varios laboratorios regidos por el Programa de Referencia de la AASHTO para Laboratorios de Materiales es de 75 golpes por lado, para que las briquetas finalmente tengan un espesor 63,5 +/- 3 mm. Posterior a formar la briqueta por medio del compactador se espera unos minutos para poder desmoldar. Cada briqueta debe dejarse enfriar a temperatura ambiente, para ser ensayada, con un máximo de tiempo de 24 horas posterior a la mezcla como menciona la norma ASTM previamente citada.

Gráfica 3.2: Molde estandarizado para compactación de briquetas

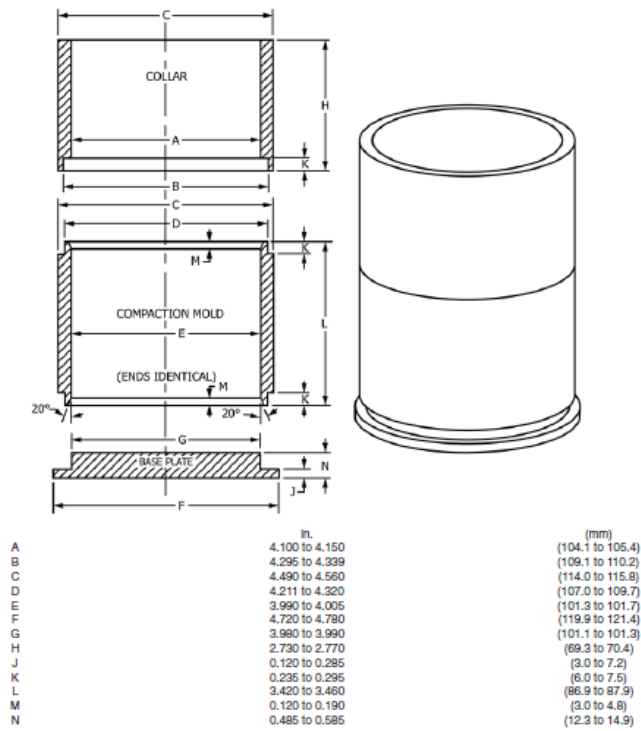


FIG. 1 Compaction Mold

Fuente: ASTM. (2016)

Gráfica 3.3: Martillo de compactación estandarizado

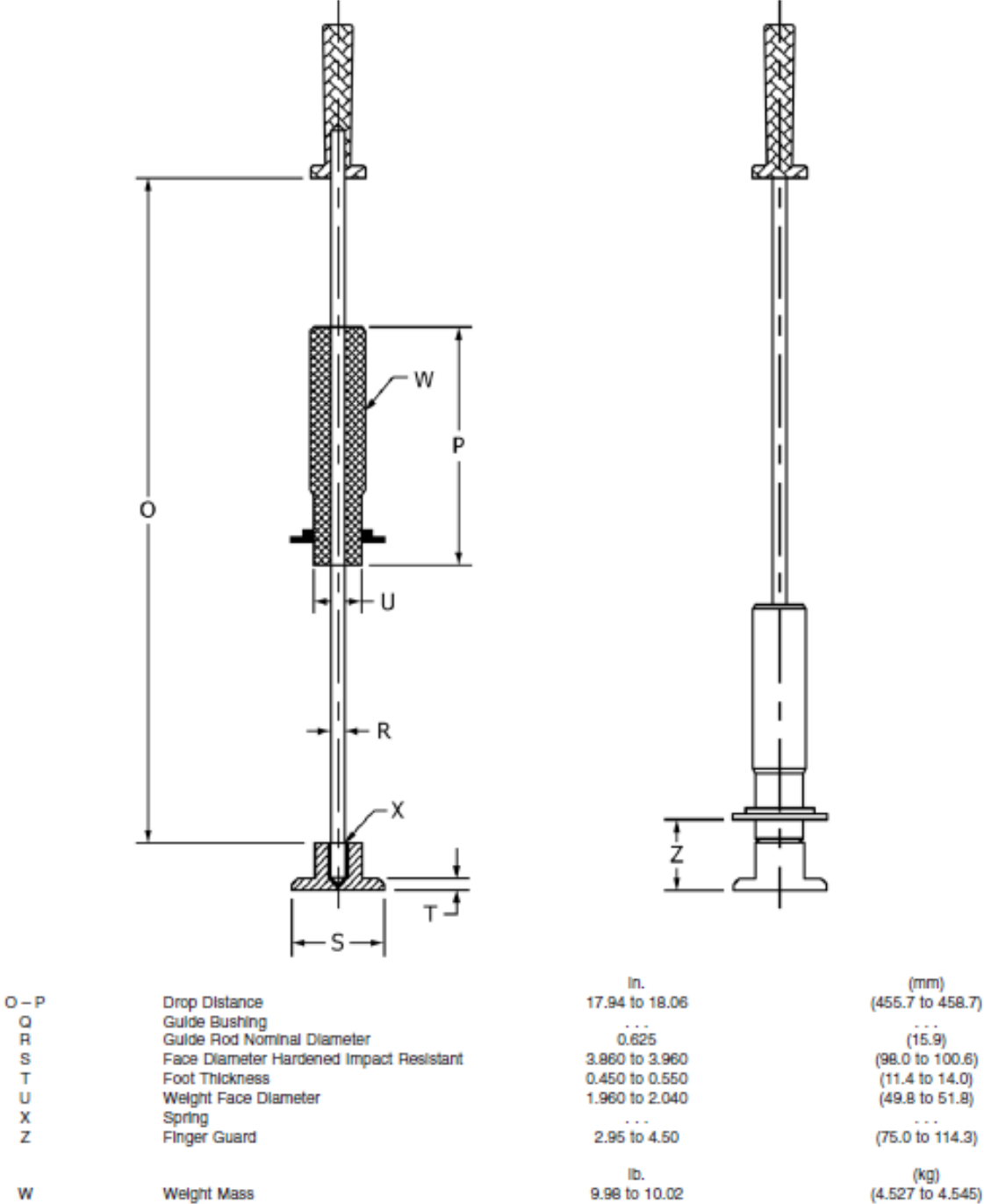


FIG. 2 Manual Compaction Hammer

Fuente: ASTM. (2016)

3.1.2.5. DETERMINACION DE GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK

Este procedimiento de ensayo se encuentra normado por ASTM D2726/2726M-17, que describe el proceso usado para el cálculo de gravedad específica Bulk y densidad relativa de briquetas compactadas de mezcla asfáltica. Se define a la gravedad específica Bulk a la relación de masa de un determinado volumen de un material a 25 °C sobre la masa de un volumen de agua igual que se encuentra a la misma temperatura 25 °C.

Para determinar el peso en agua de cada biqueta se las debe sumergir en agua a 25 +/- 1 °C de temperatura, de 3 a 5 minutos, de allí se determina la masa pesándola en agua. El siguiente valor por obtener es la masa saturada con superficie seca, para la que es necesario remover la muestra del baño de agua, secar la superficie de las briquetas eliminando el brillo producido por el agua y pesarlas al aire. Por último, estas briquetas deben ser secadas en horno a 110 +/- 5 °C hasta que alcancen masa constante, ese valor se conocerá como la masa seca.

3.2. ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MÉTODO MARSHALL

El procedimiento de ensayo para la determinación de Estabilidad y Flujo Marshall esta detallado en la norma ASTM 6927-15.

Es necesario contar con 3 muestras como mínimo, estas muestras deben ser haber sido elaboradas con el mismo tipo, calidad y gradación del agregado; así mismo como el mismo tipo y cantidad de material pasante del tamiz #200 (filler) y el asfalto del mismo fabricante. Este ensayo se realiza de forma posterior al ensayo de gravedad específica Bulk.

Se debe medir el espesor de las muestras según el procedimiento del Método A indicado en la norma ASTM D3549/3549M-17, en el cual se realizan 4 mediciones con un calibre en cada cuarto de la probeta. Con los especímenes preparados se procede a sumergirlos en un baño de agua a 60 +/- 1 °C en un periodo de 30 a 40 minutos. Paralelamente a esto se debe preparar el cabezal de ensayo calentándolo en el horno de 20 a 40 °C, previo al ensayo lubricar las paredes internas del cabezal con aceite para evitar que las briquetas se adhieran.

Al retirar la biqueta del baño se debe remover el exceso de agua de esta con una toalla, y colocar la muestra en la base del cabezal cuidando que se encuentre centrada, colocar la parte superior del cabezal y montarlo en la máquina de ensayo. El periodo de este proceso debe ser de máximo 30 segundos.

La aplicación de la carga a la muestra por parte de la máquina se realiza a una tasa constante de 50 +/- 5 mm/min. Se debe verificar que la aplicación de la carga se detenga en el punto de falla de la briqueta, permitiendo que los gráficos obtenidos por medio de la máquina sean los esperados por el Método B, el cual es útil si se cuenta con un equipo capaz de graficar estabilidad y flujo en cada instante del ensayo.

Gráfica 3.4: Cabezal estandarizado para ensayo de flujo y estabilidad Marshall

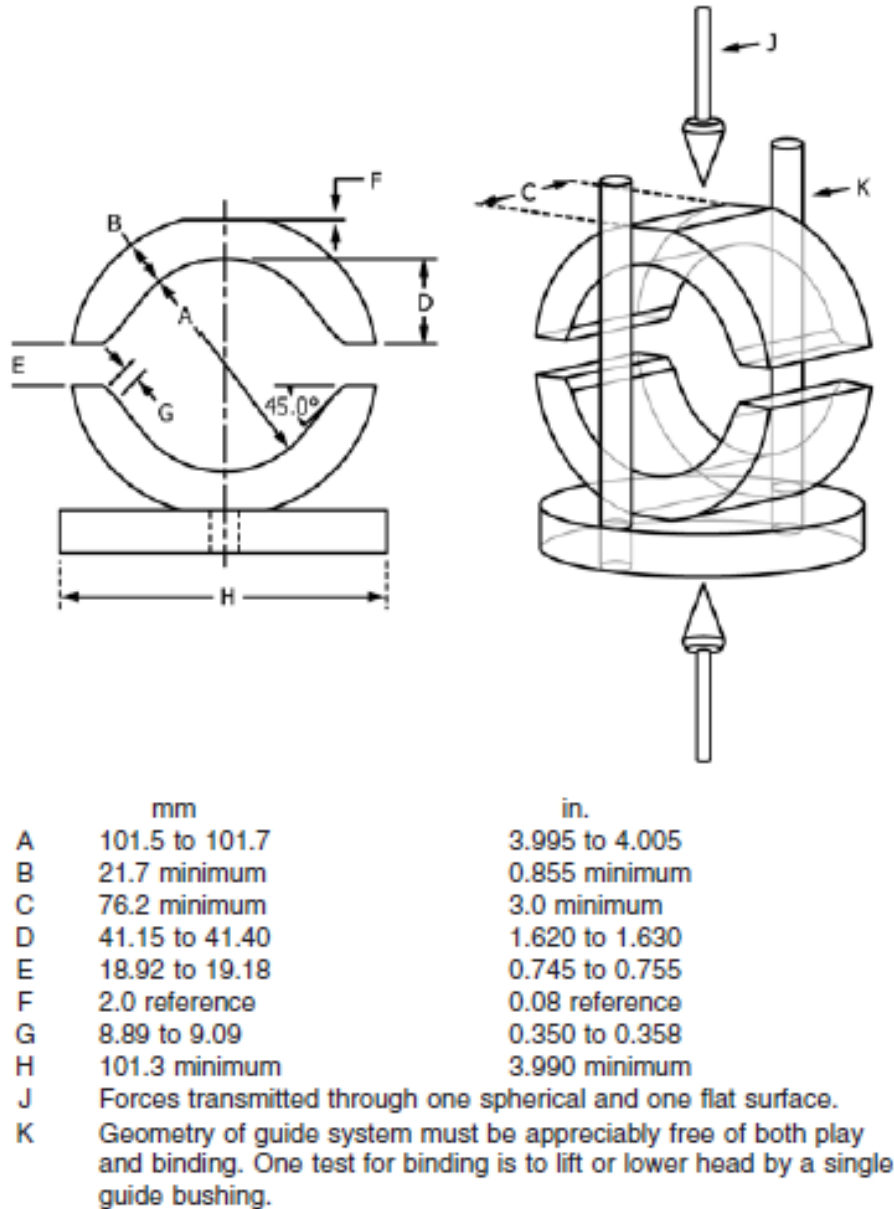


FIG. 2 Testing Head Dimensions

Fuente: ASTM. (2016).

Foto 3.5: Equipo graficador usado para medición de flujo y estabilidad Marshall



3.3. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA MAXIMA TEORICA Y LA DENSIDAD DE MEZCLAS DE PAVIMENTO BITUMINOSAS

Este procedimiento detallado en la norma ASTM D2041/2041M-11 se realiza con mezclas no compactadas a 25 °C, la determinación de la gravedad específica es necesaria ya que esta es una propiedad fundamental, cuyo valor se encuentra influenciado por la composición de la mezcla por tipo y cantidad de agregado, así como del material bituminoso, este valor es usado para el cálculo de vacíos de aire en la mezcla compactada, cálculo de bitumen absorbido en el agregado.

Una vez que la mezcla ha sido secada, pero se mantiene caliente, es necesario separar las partículas manualmente cuidando de no fracturar los agregados, y verificando que las partículas de agregado fino no superen el tamaño de 6 mm (1/4 pulg). Después de realizar esto la mezcla debe dejarse enfriar a temperatura ambiente. Una vez separado y a temperatura ambiente colocar la mezcla en un recipiente encerado y registrar su masa como peso de la muestra en el aire, añadir suficiente agua a 25 °C hasta cubrir la muestra en su totalidad, colocar la tapa del recipiente. Llevar la muestra al agitador mecánico y asegurando su base antes de encender el equipo. Iniciar la agitación, y por medio de una máquina de succión remover el aire atrapado en la muestra gradualmente

aumentando la presión de succión hasta llegar a un valor aproximado de 27 ± 2 mmHg, en un periodo máximo de 2 minutos, una vez alcanzado el valor de presión indicado permitir a la maquina trabajar por 15 ± 2 min. Terminado esto aflojar la válvula permitiendo que el aire a presión abandone el recipiente; llenar con agua a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ el recipiente con la muestra previamente agitados, colocar la tapa nuevamente al recipiente y registrar el peso del conjunto recipiente lleno con la muestra y agua a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente retirar la muestra y el agua del recipiente y llenarlo nuevamente solo con agua a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y registrar este último peso.

Foto 3.6: Equipo usado para la determinación de Gravedad Específica Máxima de la mezcla asfáltica



3.4. ESTABILIDAD Y FLUJO

3.4.1. *ESTABILIDAD MARSHALL*

La fuerza es medida en términos de Estabilidad Marshall de la mezcla, por medio de la especificación ASTM D6927 publicada en 2015, la cual establece el procedimiento de ensayo. La estabilidad Marshall está definida por la máxima carga resistida por una muestra cilíndrica compactada estandarizada a una temperatura de 60°C, ya que sometido a esta temperatura el pavimento bituminoso se encuentra en su condición más vulnerable.

3.4.2. *VALOR DE FLUJO MARSHALL*

La flexibilidad del pavimento bituminoso se encuentra medida en términos de Flujo; el cual representa el cambio en el diámetro de la muestra, medido entre el tiempo de inicio de la carga y el tiempo de carga máxima, en dirección de la aplicación de la carga. Durante el ensayo de la muestra estandarizada se mide la deformación debido a la carga aplicada. Esta deformación llamada flujo plástico medida en la rotura o punto de falla de la briqueta es determinada como valor de flujo.

3.5. PROPIEDADES VOLUMETRICAS DE LA MEZCLA

3.5.1. *VACIOS*

Son los pequeños espacios de aire que se presentan entre los agregados cubiertos en la mezcla compactada final. En toda mezcla bituminosa densa es necesario un cierto porcentaje de vacíos para permitir una compactación adicional del pavimento debido al tráfico. La durabilidad del pavimento se encuentra en función de su contenido de vacíos, ya que se relaciona directamente con su permeabilidad, en el caso de contar con demasiados vacíos se permite la entrada de agua y aire que pueden dañar la mezcla, en el caso contrario un contenido de vacíos muy bajo puede llevar al sangrado, o en inglés flushing que se describe como la condición en la cual el asfalto de la mezcla se desprende de los agregados hacia la superficie. Así mismo el contenido de vacíos es inversamente proporcional a la densidad de la mezcla ya que un contenido de vacíos menor permitirá una mezcla más densa.

3.5.2. *VTM VACIOS TOTALES EN LA MEZCLA*

Son los espacios de la mezcla que no son ocupados por asfalto o por agregados y se expresan como un porcentaje del volumen total.

3.5.3. VFA VACIOS LLENOS DE ASFALTO

Es el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada que se llenan con cemento asfáltico, este valor sirve como un indicador de la cantidad de asfalto usado en la mezcla ya que un valor demasiado bajo de VFA significa que la cantidad de asfalto no es suficiente para proporcionar durabilidad a la mezcla.

3.5.4. VMA VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL

Son los espacios de aire existentes entre las partículas de agregado en una mezcla asfáltica compactada, incluyendo los VFA. Estos vacíos representan el espacio disponible con el que cuenta el asfalto para acomodarse en la mezcla.

3.6. CÁLCULOS MEZCLA EN CALIENTE CONVENCIONAL

Para iniciar el diseño de la mezcla en caliente convencional, previamente se realizó la caracterización de los materiales.

En base a la granulometría del material fino y grueso se procede a realizar una mezcla de los dos, para que satisfagan la especificación ASTM D3515; una vez contando con estos datos se calcula un porcentaje aproximado de demanda de asfalto según la combinación de agregados realizada. En el caso de esta investigación la curva granulométrica de la mezcla se encuentra dentro de los límites señalados por el MOP y los porcentajes usados para obtener esta combinación satisfactoria fueron de 65% del agregado fino y 45% del agregado grueso.

Tabla 3.1: Mezcla de agregados fino y grueso con respecto a la especificación MOP

PORCENTAJE DE MEZCLA DE LOS AGREGADOS

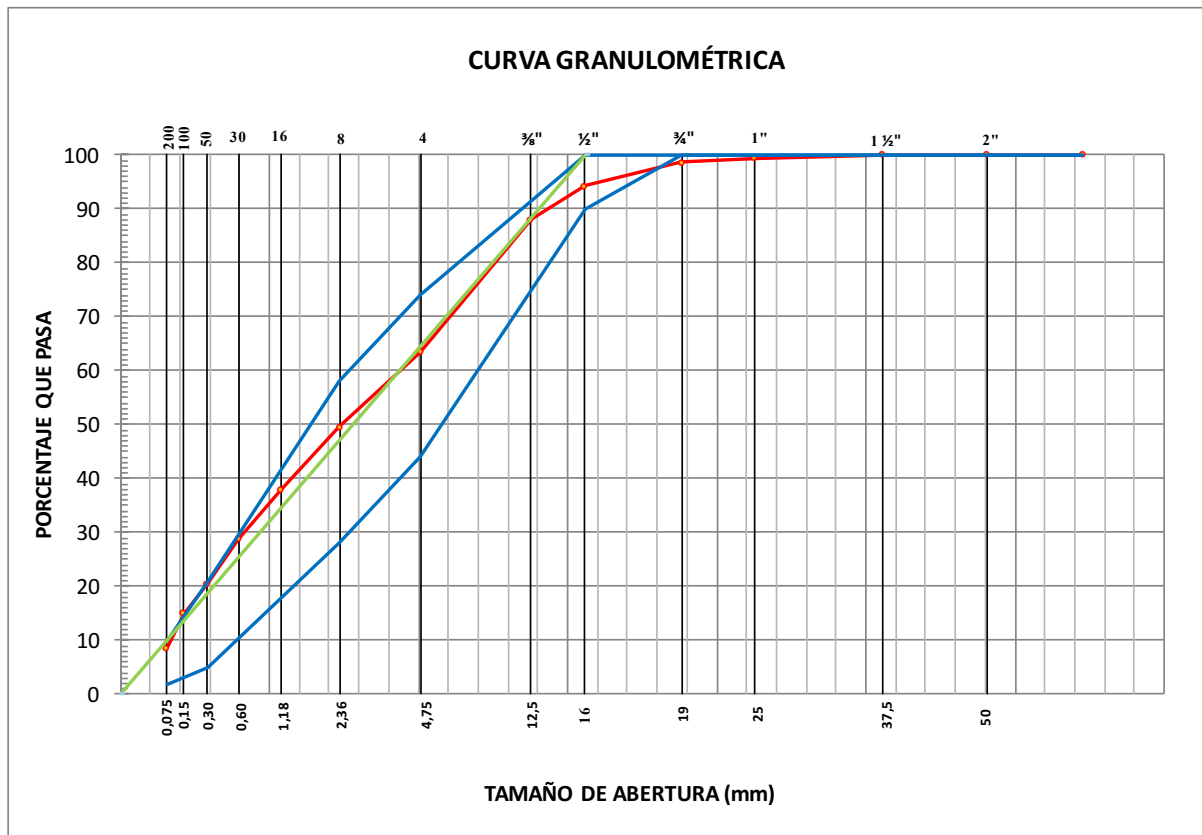
MALLA		2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4 "	1/2 "	3/8"	Nº 4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200
ABERTURA	(mm)	63	50	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
ESPECIFICACIÓN	MÍN	100	100	100	100	100	90	---	44	28	---	---	5	---	2
	MÁX	100	100	100	100	100	100	---	74	58	---	---	21	---	10
AGREGADO	FINO	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	90,4	68,9	50,9	36,9	24,2	15,9	6,0
AGREGADO	GRUESO	100	100,0	100,0	98,6	96,0	83,7	67,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6
MEZCLA AGREGADOS		100,0	100,0	100,0	99,5	98,6	94,3	88,0	63,5	49,5	37,9	28,7	20,5	15,1	8,7

PORCENTAJES DE MEZCLA

Agregado Fino	65%
Agregado Grueso	35%

LÍMITES DE LA ESPECIFICACIÓN MOP 001 F 2002 tabla 405 - 5.1 - Agregado tamaño nominal 3/4" (ASTM 3515)

Gráfica 3.5: Curva granulométrica de la mezcla de agregados



Después de realizar la mezcla de los agregados y habiendo verificado que esta cumpla la especificación encontrándose dentro de los límites, se procede al cálculo del porcentaje de asfalto necesario para la mezcla en caliente.

Ecuación 3.1: Porcentaje de asfalto teórico necesario para la mezcla en caliente

$$P = M \times S^{1/5}$$

Donde:

P = Porcentaje de asfalto en peso, con respecto al peso total de los agregados minerales.

M = Coeficiente de tráfico (3,75 – 4,25)

S = Superficie específica de los agregados.

$$S = 0,17G + 0,33g + 2,30A + 12a + 135f$$

G = Porcentaje retenido acumulado en el tamiz 3/8"

g = Porcentaje retenido acumulado entre los tamices 3/8" y #4

A = Porcentaje retenido acumulado entre los tamices #4 y #50

a = Porcentaje retenido acumulado entre los tamices #50 y #200

f = Porcentaje retenido acumulado pasante del tamiz #200

En este caso el porcentaje teórico necesario fue de 6% de asfalto, por lo tanto, para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla es necesario realizar 5 conjuntos de 3 briquetas cada una con el porcentaje teórico calculado y de 0,5% y 1% de variación. Por lo tanto las briquetas realizadas fueron de 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5% y 7,0% de contenido de asfalto con respecto a la mezcla.

A continuación, se indica la cantidad de material retenido en cada malla necesario para formar la briketa de aproximadamente 1100 gr.

Tabla 3.2: Cantidad de material retenido en cada tamiz necesario para la elaboración de una briketa

MALLA	3/4 "	1/2 "	3/8"	N° 4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	FILLER
peso	11,48	55,00	78,63	297,40	113,45	208,56	92,80	83,75	55,18	39,60	64,15
p. acum.	11,48	66,48	145,11	442,51	555,96	764,52	857,32	941,07	996,25	1035,85	1100,00

Una vez realizada la mezcla y elaboradas las briquetas se procedió con el ensayo de Gravedad específica Bulk descrito previamente, habiendo realizado esto, el siguiente paso fue ensayar las briquetas para obtener los valores de Estabilidad y Flujo Marshall, paralelamente se realizó la mezcla asfáltica sin compactar para la determinación de la Gravedad específica máxima teórica.

Contando ya con esta información de los ensayos se tabularon los resultados que serán presentados a continuación, detallando las 15 briquetas elaboradas y agrupándolas por el porcentaje de asfalto con el que cada una cuenta.

Tabla 3.3: Pesos, volumen y densidades de cada briqueta de mezcla asfáltica en caliente convencional

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Seco (gr)	Peso Sup. Sat. Sec (gr)	Peso Sumergido	Volumen Briqueta (cm3)	D. Bulk (g/cm3)	Gmm (g/cm3)
1	5,0	1130,44	1135,13	619,57	515,56	2,193	2,393
2	5,0	1146,67	1148,98	625,12	523,86	2,189	2,393
3	5,0	1154,25	1157,23	631,89	525,34	2,197	2,393
					PROMEDIO	2,193	2,393
4	5,5	1155,60	1156,79	641,54	515,25	2,243	2,354
5	5,5	1149,29	1151,82	633,78	518,04	2,219	2,354
6	5,5	1152,01	1154,73	633,37	521,36	2,210	2,354
					PROMEDIO	2,224	2,354
7	6,0	1161,05	1163,16	641,18	521,98	2,224	2,358
8	6,0	1163,16	1165,54	642,79	522,75	2,225	2,358
9	6,0	1158,85	1160,41	641,06	519,35	2,231	2,358
					PROMEDIO	2,227	2,358
10	6,5	1169,25	1170,12	652,49	517,63	2,259	2,325
11	6,5	1165,47	1166,10	653,48	512,62	2,274	2,325
12	6,5	1171,21	1171,53	655,13	516,40	2,268	2,325
					PROMEDIO	2,267	2,325
13	7,0	1174,29	1174,81	653,17	521,64	2,251	2,303
14	7,0	1177,05	1177,67	649,05	528,62	2,227	2,303
15	7,0	1172,05	1172,40	658,87	513,53	2,282	2,303
					PROMEDIO	2,253	2,303

Tabla 3.4: Vacíos en la mezcla asfáltica en caliente convencional

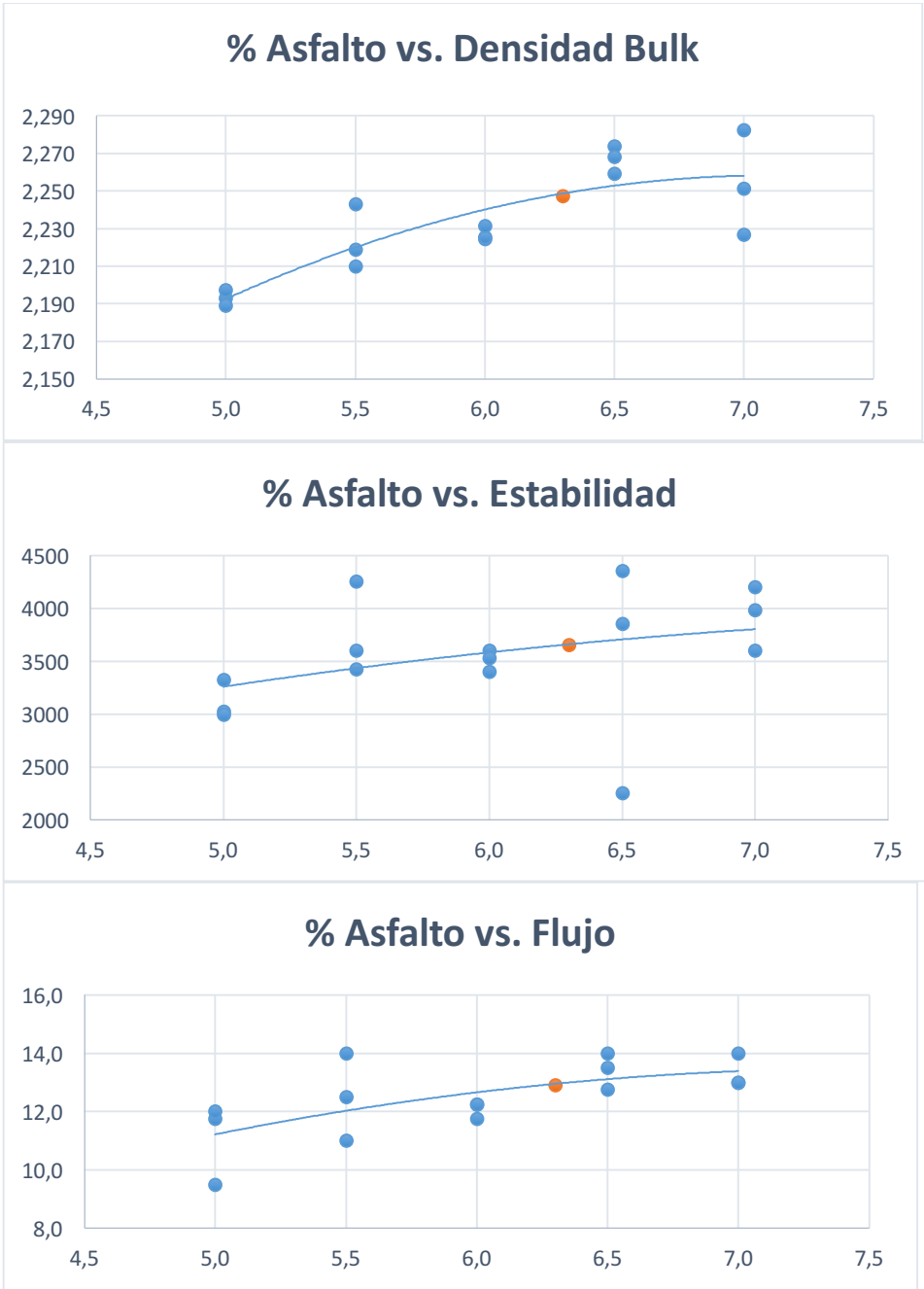
Briqueta	Porcentaje Asfalto	V. a. (%)	V. agr. (%)	VAM (%)	VAF (%)
1	5,0	8,37	73,4	26,63	68,57
2	5,0	8,53	73,2	26,76	68,13
3	5,0	8,18	73,5	26,48	69,10
		8,4	73,4	26,6	68,6
4	5,5	4,72	74,7	25,35	81,37
5	5,5	5,75	73,8	26,16	78,01
6	5,5	6,13	73,5	26,45	76,82
		5,5	74,0	26,0	78,7
7	6,0	5,65	73,6	26,35	78,56
8	6,0	5,62	73,7	26,33	78,66
9	6,0	5,35	73,9	26,12	79,51
		5,5	73,7	26,3	78,9
10	6,5	2,86	74,4	25,61	88,83
11	6,5	2,23	74,9	25,12	91,13
12	6,5	2,47	74,7	25,31	90,26
		2,5	74,7	25,3	90,1
13	7,0	2,23	73,7	26,26	91,50
14	7,0	3,30	72,9	27,06	87,82
15	7,0	0,88	74,8	25,24	96,52
		2,1	73,8	26,2	91,9

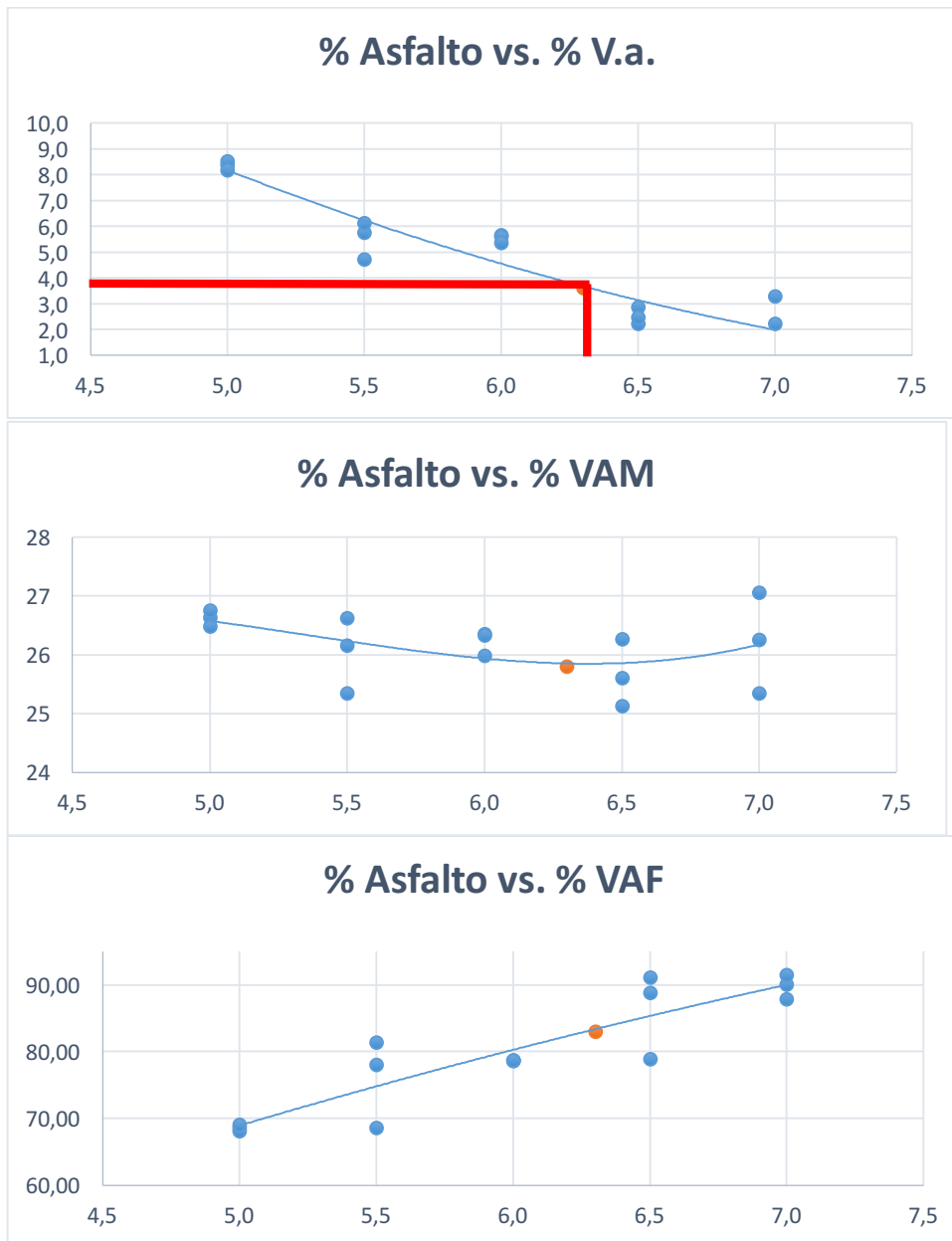
Tabla 3.5: Valores de Estabilidad y Flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente convencional

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
		Lectura	F Correc.	Corregida	
1	5,0	3020	1,00	3020	10
2	5,0	2990	1,00	2990	12
3	5,0	3320	1,00	3320	12
				3110	11
4	5,5	4250	1,00	4250	14
5	5,5	3420	1,00	3420	11
6	5,5	3600	1,00	3600	13
				3757	13
7	6,0	3600	1,00	3600	12
8	6,0	3525	1,00	3525	12
9	6,0	3400	1,00	3400	12
				3508	12
10	6,5	3850	1,00	3850	14
11	6,5	3920	1,00	3920	13
12	6,5	4350	1,00	4350	14
				4040	13
13	7,0	4200	1,00	4200	14
14	7,0	3750	0,96	3600	13
15	7,0	3980	1,00	3980	13
				3927	13

De la misma manera, estos datos se encuentran representados gráficamente y son presentados a continuación:

Gráfica 3.6: Representación los resultados de la mezcla asfáltica en caliente convencional por porcentajes de asfalto





3.7. CÁLCULOS MEZCLA EN CALIENTE MODIFICADA CON LANA DE ACERO “AUTO REPARABLE”

Para el diseño de la mezcla modificada se tomó como base el diseño de la mezcla convencional, de la cual se obtuvo como resultado que el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla es de 6,3%; el criterio aplicado para la elección de este valor es que el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla es aquel en el cual el porcentaje de vacíos en la mezcla es de 4%.

Según la investigación realizada por Quantao Liu (2012), enfocada principalmente a la conductividad que brindan las fibras en la mezcla asfáltica, recomienda que el porcentaje en peso de lana de acero con respecto al bitumen no sobrepase el 8% por las dificultades que se presentan en el proceso de mezcla, y a su vez con la recomendación de un porcentaje no mayor al 7% de fibras de lana de acero de su colega Álvaro García (2014), que profundizó en el estudio de propiedades mecánicas de esta mezcla asfáltica años más tarde, de tal manera que en esta disertación se decidió trabajar con 4 dosificaciones de lana de acero en la mezcla: 1%, 3%, 5% y 7% en relación con la cantidad de asfalto.

Con diferencia al procedimiento anterior en el que se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto, en este caso se elaboraron 6 briquetas por cada porcentaje de lana de acero por cualquier inconveniente y obtener resultados más precisos.

El procedimiento de mezcla es similar al anterior, la adición de las fibras de lana de acero se realiza en el agregado caliente, con los movimientos de mezcla entre estos dos materiales aseguramos su homogeneidad y procedemos a agregar la cantidad de 6,3% de asfalto óptimo.

De la misma manera gracias a los datos obtenidos con los ensayos, se presentan a continuación los resultados tabulados de las 24 briquetas realizadas con la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero.

Tabla 3.6: Pesos, volumen y densidades de cada briqueta de mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Lana de acero (%)	Peso Seco (gr)	Peso Sup. Sat. Sec (gr)	Peso Sumergido (gr)	Volumen Briqueta (cm3)	D. Bulk (g/cm3)	Gmm (g/cm3)
1	6,3	1,0	1158,38	1159,36	646,67	512,69	2,259	2,338
2	6,3	1,0	1168,15	1169,49	650,01	519,48	2,249	2,338
3	6,3	1,0	1167,93	1168,30	658,58	509,72	2,291	2,338
4	6,3	1,0	1166,77	1167,82	652,92	514,90	2,266	2,338
5	6,3	1,0	1156,30	1157,97	642,95	515,02	2,245	2,338
6	6,3	1,0	1165,72	1166,54	648,01	518,53	2,248	2,338
						PROMEDIO	2,260	2,338
7	6,3	3,0	1168,68	1169,12	659,43	509,69	2,293	2,336
8	6,3	3,0	1168,68	1169,66	652,06	517,60	2,258	2,336
9	6,3	3,0	1172,08	1173,17	651,95	521,22	2,249	2,336
10	6,3	3,0	1169,43	1170,63	653,02	517,61	2,259	2,336
11	6,3	3,0	1177,04	1177,70	657,02	520,68	2,261	2,336
12	6,3	3,0	1164,20	1165,46	645,08	520,38	2,237	2,336
						PROMEDIO	2,259	2,336
13	6,3	5,0	1172,05	1172,93	655,84	517,09	2,267	2,338
14	6,3	5,0	1170,89	1173,95	647,30	526,65	2,223	2,338
15	6,3	5,0	1166,15	1167,85	650,75	517,10	2,255	2,338
16	6,3	5,0	1167,98	1169,20	651,23	517,97	2,255	2,338
17	6,3	5,0	1167,41	1169,73	645,46	524,27	2,227	2,338
18	6,3	5,0	1176,02	1177,27	659,84	517,43	2,273	2,338
						PROMEDIO	2,250	2,338
19	6,3	7,0	1166,27	1169,95	649,46	520,49	2,241	2,338
20	6,3	7,0	1167,25	1170,23	652,65	517,58	2,255	2,338
21	6,3	7,0	1178,66	1182,14	656,97	525,17	2,244	2,338
22	6,3	7,0	1170,23	1172,88	652,57	520,31	2,249	2,338
23	6,3	7,0	1164,85	1166,99	647,92	519,07	2,244	2,338
24	6,3	7,0	1169,44	1174,05	649,60	524,45	2,230	2,338
						PROMEDIO	2,244	2,338

Tabla 3.7: Vacíos en la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Lana de acero (%)	V. a. (%)	V. agr. (%)	VAM (%)	VAF (%)
1	6,3	1,0	3,35	74,6	25,43	86,84
2	6,3	1,0	3,80	74,2	25,79	85,25
3	6,3	1,0	1,98	75,6	24,38	91,87
4	6,3	1,0	3,06	74,8	25,21	87,85
5	6,3	1,0	3,96	74,1	25,90	84,73
6	6,3	1,0	3,83	74,2	25,80	85,16
			3,3	74,6	25,4	87,0
7	6,3	3,0	1,84	75,7	24,33	92,43
8	6,3	3,0	3,34	74,5	25,48	86,89
9	6,3	3,0	3,73	74,2	25,78	85,52
10	6,3	3,0	3,28	74,6	25,44	87,10
11	6,3	3,0	3,23	74,6	25,39	87,30
12	6,3	3,0	4,23	73,8	26,16	83,85
			3,3	74,6	25,4	87,2
13	6,3	5,0	3,04	74,8	25,19	87,92
14	6,3	5,0	4,90	73,4	26,62	81,60
15	6,3	5,0	3,53	74,4	25,57	86,18
16	6,3	5,0	3,54	74,4	25,58	86,14
17	6,3	5,0	4,75	73,5	26,51	82,08
18	6,3	5,0	2,78	75,0	24,99	88,88
			3,8	74,3	25,7	85,5
19	6,3	7,0	4,15	74,0	26,05	84,06
20	6,3	7,0	3,53	74,4	25,57	86,19
21	6,3	7,0	4,00	74,1	25,93	84,58
22	6,3	7,0	3,79	74,2	25,77	85,28
23	6,3	7,0	4,01	74,1	25,94	84,55
24	6,3	7,0	4,62	73,6	26,41	82,52
			4,0	74,1	25,9	84,5

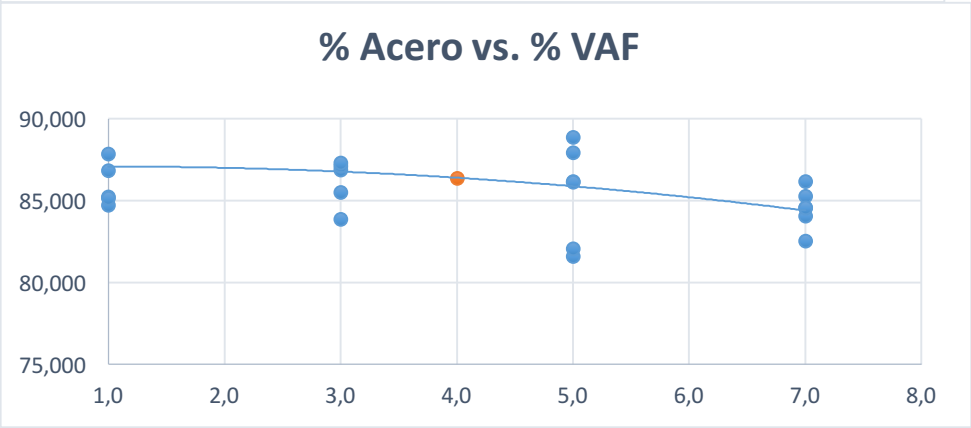
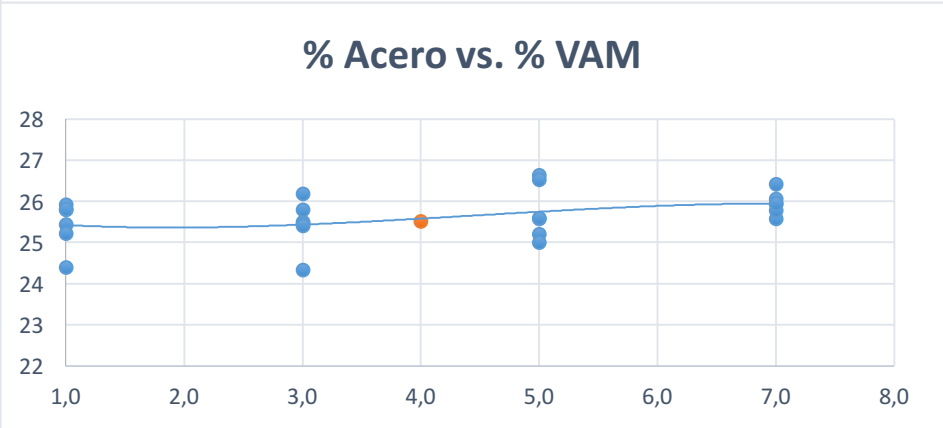
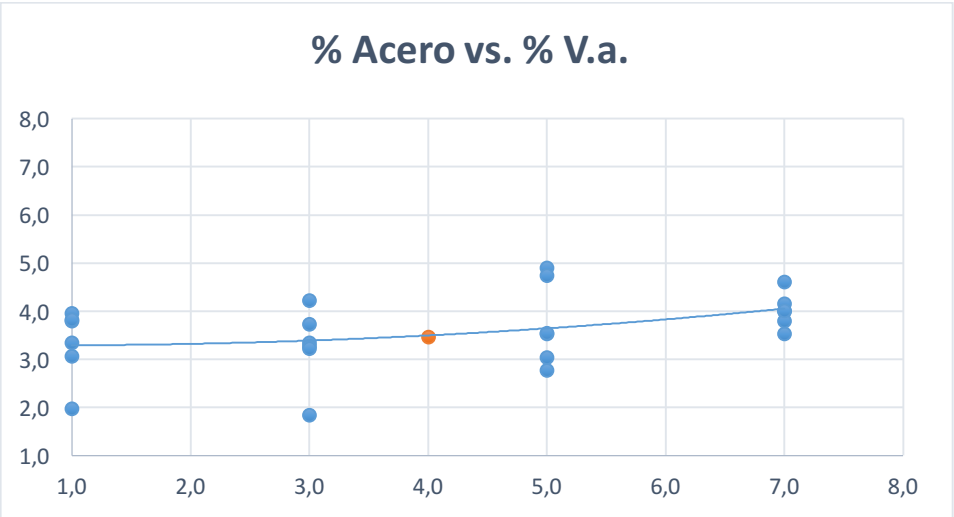
Tabla 3.8: Valores de Estabilidad y Flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Lana de acero (%)	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
			Lectura	F Correc.	Corregida	
1	6,3	1,0	4350	1,00	4350	14
2	6,3	1,0	4250	1,00	4250	14
3	6,3	1,0	4125	1,00	4125	15
4	6,3	1,0	4000	1,00	4000	14
5	6,3	1,0	4000	1,00	4000	14
6	6,3	1,0	4000	1,00	4000	14
					4121	14
7	6,3	3,0	3950	1,00	3950	15
8	6,3	3,0	3950	1,00	3950	15
9	6,3	3,0	3300	1,00	3300	13
10	6,3	3,0	3575	1,00	3575	15
11	6,3	3,0	3825	1,00	3825	12
12	6,3	3,0	4050	1,00	4050	16
					3775	14
13	6,3	5,0	4350	1,00	4350	17
14	6,3	5,0	3000	0,96	2880	19
15	6,3	5,0	4200	1,00	4200	16
16	6,3	5,0	4350	1,00	4350	15
17	6,3	5,0	3900	0,96	3744	15
18	6,3	5,0	3650	1,00	3650	16
					3862	16
19	6,3	7,0	3900	1,00	3900	16
20	6,3	7,0	4300	1,00	4300	15
21	6,3	7,0	4350	0,96	4176	16
22	6,3	7,0	3700	1,00	3700	16
23	6,3	7,0	3750	1,00	3750	19
24	6,3	7,0	3800	0,96	3648	21
					3912	17

De la misma forma que fueron presentados los datos para la mezcla convencional, los resultados obtenidos para la mezcla en caliente modificada con diferentes porcentajes de lana de acero se presentan a continuación de forma gráfica.

Gráfica 3.7: Representación los resultados de la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero, por porcentajes de acero respecto al bitumen





3.8. MEDIDA DE FLUJO Y ESTABILIDAD EN PROBETAS DE MEZCLA COMÚN Y PROBETAS DE MEZCLA MODIFICADA POST REPARACIÓN

Como un proceso adicional a esta investigación, con el fin de comparar los resultados de flujo y estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente convencional y de la mezcla asfáltica en caliente con lana de acero post recuperación; se elaboraron 12 probetas en forma de disco, con un espesor de $\frac{1}{3}$ del espesor estandarizado de las muestras elaboradas previamente (21,17 mm aproximadamente). Se decidió optar por este tipo de muestra, ya que en la investigación realizada por el Dr. Schlangen (2013) las muestras son viguetas prismáticas; y el laboratorio no contaba con el equipo necesario para la elaboración de este tipo de muestras.

Foto 3.7: Discos elaborados para medición de flujo y estabilidad



El proceso llevado a cabo fue similar que se siguió para la elaboración y compactado de las probetas cilíndricas según el Método Marshall, con la diferencia de que se compactaron con 75 golpes en una sola cara de estos discos.

Los 6 discos elaborados con la mezcla asfáltica en caliente convencional, con un porcentaje óptimo de asfalto de 6,3 %, se ensayaron según la normativa ASTM para obtención de flujo y estabilidad Marshall.

Las 6 briquetas restantes se elaboraron con el porcentaje de asfalto de 6,3% mencionado anteriormente y el 4% de lana de acero con respecto al bitumen, valor óptimo de este material en la mezcla. Estas 6 briquetas posteriormente a su compactación y al haber alcanzado la temperatura ambiente fueron congeladas durante 24 horas, para permitir una falla frágil. La rotura se llevó a cabo usando la máquina universal disponible en el laboratorio.

Foto 3.8: Discos de mezcla asfáltica modificada con 4% de lana de acero previo a la rotura



Foto 3.9: Rotura de los discos de mezcla asfáltica modificada con lana de acero



El proceso de reparación de los discos de mezcla modificada se realizó colocando las dos partes de cada disco ya habiendo alcanzado la temperatura ambiente nuevamente, de vuelta en el molde y llevándolos al horno a una temperatura de 110 °C, valor que se encuentra dentro del rango de 90 a 140 °C que evita el exceso de calentamiento del asfalto, durante 10 minutos. Después de salir del horno y alcanzar la temperatura ambiente fueron evaluados sus valores de flujo y estabilidad, tal como se hicieron los 6 discos de mezcla convencional.

Foto 3.10: Discos rotos de mezcla asfáltica modificada con lana de acero



Foto 3.11: Discos de mezcla modificada con lana de acero post recuperación



Foto 3.12: Ensayo de flujo y estabilidad Marshall de los discos de mezcla asfáltica

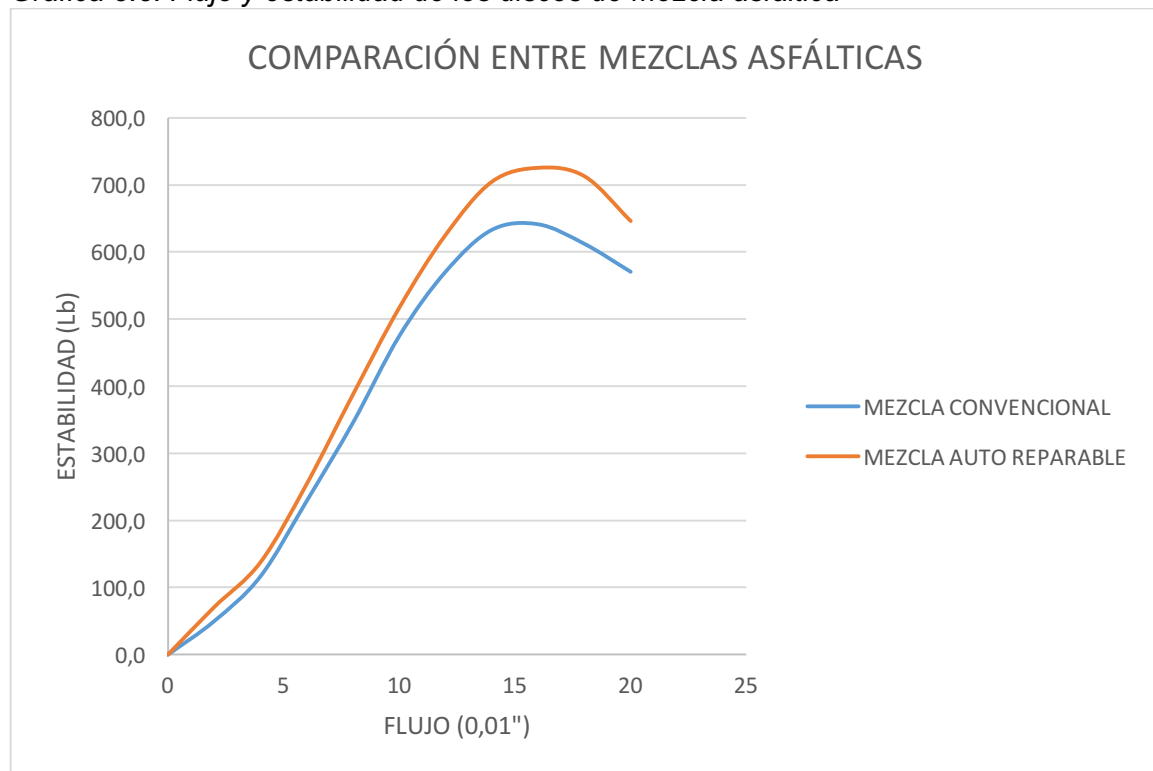


A continuación, se presentan los resultados tabulados y adicionalmente, representados mediante gráficos; de flujo y estabilidad para ambas mezclas asfáltica.

Tabla 3.9: Medidas de flujo y estabilidad Marshall en los discos

MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL		MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON LANA DE ACERO - POST REPARACIÓN	
FLUJO	ESTABILIDAD	FLUJO	ESTABILIDAD
0	0,0	0	0,0
2	50,0	2	70,8
4	116,7	4	137,5
6	229,2	6	254,2
8	345,8	8	387,5
10	475,0	10	516,7
12	570,8	12	625,0
14	633,3	14	704,2
16	641,7	16	725,0
18	612,5	18	712,5
20	570,8	20	645,8

Gráfica 3.8: Flujo y estabilidad de los discos de mezcla asfáltica



4. CAPÍTULO 4

4.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS ENTRE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL Y LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA

Los resultados del ensayo de flujo y estabilidad mediante el Método Marshall, para la mezcla en caliente convencional deben cumplir con las especificaciones de la normativa NEVI 12- Volumen 3, Tabla 405-5,5.9.

Tabla 4.1: Requisitos para Mezcla Asfáltica

Tabla 405-5.9 Requisitos para Mezcla de Hormigón Bituminoso

Parámetros de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall (MTC E 504)			
1. Estabilidad	8 kN (815Kg)	5,34 kN (544Kg)	4,45 kN (453Kg)
2. Flujo 0,25 mm	8 - 14	8 - 16	8 - 2
3. Porcentaje de vacíos con aire ⁽¹⁾ (MTC E 505)	3 - 5	3 - 5	3 - 5
4. Vacíos en el agregado mineral	Tabla 403-4.11		
5. Compactación, núm de golpes en cada capa de testigo	75	50	50
c. Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín)	70	70	70
d. Resistencia Conservada en la Prueba de Tracción indirecta (mín)	70	70	70
e. Relación Polvo - Asfalto	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3
f. Relación Est. / flujo ⁽²⁾	1700 – 2500		

El índice de Compactibilidad mínimo será de 5.

El índice de Compactibilidad se define como:

Siendo GB 50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Fuente: NEVI 12, Vol. 3 (2013)

En la tabla de resumen mostrada a continuación se muestra una comparación de las principales propiedades resultado de ensayos en laboratorio en ambas mezclas: mezcla en caliente convencional y mezcla en caliente modificada con lana de acero, ambas mezclas con sus contenidos óptimos de asfalto y de acero.

Tabla 4.2: Resumen de propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas

	MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL	MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE MODIFICADA CON LANA DE ACERO
CONTENIDO DE ASFALTO (%)	6,3	6,3
CONTENIDO DE LANA DE ACERO (%)	0,0	4,0
ESTABILIDAD (lb)	3650	3790
FLUJO (0,01")	13	15
VACIOS TOTALES EN LA MEZCLA (%)	3,60	3,47
VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL (%)	25,80	25,50
VACIOS LLENOS DE ASFALTO (%)	83,00	86,35

4.2. ANÁLISIS DE COSTO ADICIONAL EN LA MEZCLA MODIFICADA CON LANA DE ACERO

Como contenido adicional a esta investigación, se presenta una evaluación de precio debido a la adición de la lana de acero a la mezcla, tomando en cuenta que como resultado de los ensayos se obtuvo un porcentaje óptimo de este material en la mezcla de 4% con respecto al bitumen.

La evaluación se realizó tomando en cuenta las dimensiones normativas de las briquetas y conociendo la cantidad de agregados, fino y grueso, asfalto y lana de acero, para la obtención del volumen de cada briqueta.

Posterior a esto se calculó la cantidad de briquetas que formarían un volumen de 1m³, y a su vez el peso necesario de cada material componente de la mezcla asfáltica en caliente modificada.

El precio por unidad de lana de acero que se comercializa en el país es de 0,80 centavos de dólar, cada unidad tiene un peso aproximado de 125 gr; concluyendo así que cada metro cubico de mezcla tiene un costo adicional de 34 dólares debido a la adición de lana de acero.

Foto 4.1: Presentación comercial de la lana de acero



Tabla 4.3: Aumento de costo por adición de lana de acero en la mezcla asfáltica

AGREGADO EN BRIQUETAS	1100	gr
AGREGADO FINO	715	gr
AGREGADO GRUESO	385	gr
DIAMETRO BRIQUETA	101,6	mm
ALTO BRIQUETA	65,3	mm
VOL. BRIQUETA	529408	mm ³
BRIQUETAS PARA 1m ³	1889	u
AGREGADO PARA 1m ³	2077792,65	gr
AGREGADO FINO PARA 1m ³	1350565,22	gr
AGREGADO GRUESO PARA 1m ³	727227,42	gr
Asfalto 6,3% de peso agregados	130900,93	gr
Lana de acero (4% respecto al asfalto)	5236,03	gr
Costo de lana de acero	0,80	\$/u
Peso lana de acero	125	gr/u
# Estropajos necesarios para 1m ³	42	u
Costo adicional por m ³	34,00	\$
Costo adicional por m ² ESP. 10cm	3,35	\$
Costo adicional por m ² ESP. 7,5cm	2,51	\$
Costo adicional por m ² ESP. 5cm	1,68	\$

4.3. PROCESO DE REPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON LANA DE ACERO EN LAS VÍAS

Gráfica 4.1: Proceso de auto-reparación en vías.



Fuente: Schlangen. (2013).

Las fibras de lana de acero se mezclan en el bitumen. Cuando la superficie comienza a agrietarse, se introduce un campo magnético que comienza a calentar las fibras por inducción. Esto luego vuelve a fundir el bitumen que fluye hacia las grietas y vuelve a sellar la superficie.

5. CAPÍTULO 5

5.1. CONCLUSIONES

- Tanto el agregado grueso y fino, obtenidos en San Antonio, representan un agregado de calidad regular a mala para el uso en mezclas asfálticas, pero incluso siendo el mismo de estas condiciones, la única especificación con la que no cumple es la de resistencia a los sulfatos por parte del agregado grueso.
- El cemento asfáltico AC-20 de Imptek, tuvo resultados satisfactorios en todos los ensayos de caracterización como se muestra en la tabla 2.3, donde se indica la normativa y los valores con los que debe cumplir el cemento asfáltico, por lo que se aprobó su uso en ambas mezclas asfálticas en caliente: convencional y modificada con lana de acero.
- Tras el primer ensayo de estabilidad y flujo según el método Marshall, y el análisis de densidad y vacíos se determinó que el porcentaje de asfalto óptimo en la mezcla es de 6,3 %.
- Tomando como base el diseño de la mezcla convencional según el Método Marshall en donde se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto, se realizó otro ensayo de estabilidad y flujo acompañado a su vez del análisis de propiedades volumétricas, en donde como resultado se determinó que la cantidad de lana de acero óptima es el 4% con respecto al bitumen.
- El ensayo de flujo y estabilidad muestra que la mezcla asfáltica en caliente modificada con lana de acero tiene un aumento en la estabilidad de 3790 lb con respecto a la mezcla convencional que tiene una estabilidad de 3650, representando un aumento porcentual de aproximadamente 4%. De este mismo ensayo la medida de flujo de la mezcla convencional es de 13 centésimas de pulgada, que al igual que la estabilidad, muestra un incremento a 15 centésimas de pulgada.
- Las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica convencional, tanto como los de la mezcla asfáltica modificada con 4% de lana de acero son evaluados con respecto a la especificación de las normas usadas en esta investigación (ASTM D3203/D3203M-17, ASTM D3515-01), estando los vacíos totales en la mezcla dentro del rango de 3 a 5%, los vacíos del agregado mineral superiores al 13% indicado y los vacíos llenos de asfalto pasando el límite superior de 75% siendo en ambos aproximadamente 80%.

- En el ensayo adicional de flujo y estabilidad realizado con los discos de mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con lana de acero post reparación, los cuales no son estandarizados ni cuentan con una especificación, solo sirven como indicadores, se obtuvo una estabilidad de 640 lb mientras que en los discos modificados y reparados el promedio de estabilidad es de 725 lb, siendo en ambos el flujo de 16 centésimas de pulgada.
- Debido al ensayo mencionado anteriormente, y el ensayo de flujo y estabilidad Marshall para obtener contenidos óptimos de asfalto y acero, queda demostrada una mejora en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente gracias a la adición de lana de acero y que el proceso de auto reparación es real.
- El aumento en el costo de la mezcla asfáltica por la adición de las fibras de lana de acero representa muy poco comparado con los beneficios y mejoras en flujo y estabilidad Marshall demostradas en esta disertación como a su vez el incremento de la ductilidad, la variación positiva en el módulo dinámico, su deformación a largo plazo demostradas en la investigación de García.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para obtener los beneficios mencionados de la mezcla modificada es necesario asegurar la buena distribución de las fibras de la lana de acero en la mezcla asfáltica en caliente, esto se logra en el proceso de mezcla, combinando primero las fibras de lana de acero con los agregados y añadiendo posteriormente la cantidad de asfalto óptima.
- Se recomienda que las fibras de lana acero tengan el tamaño recomendado de 0,2 cm, siendo estas de una longitud máxima de 0,5 cm ya que esto permite que estas ocupen los espacios disponibles, asegurando los beneficios mencionados en la mejora de sus propiedades y el proceso de auto reparación.
- Se recomienda el uso de lana de acero en la mezcla asfáltica, ya que el ensayo de flujo y estabilidad muestra que la mezcla asfáltica en caliente modificada (con lana de acero) tiene un aumento en la estabilidad de 3790 lb con respecto a la mezcla convencional que tiene una estabilidad de 3650, representando un aumento porcentual de aproximadamente 4%.

6. BIBLIOGRAFIA

- Asphalt Pavement Association of Michigan. (2008). *What is Hot Mix Asphalt Pavement?* Febrero 6, 2018, de National Asphalt Pavement Association Sitio web: http://www.apa-mi.org/what_is_hot_mix_asphalt_paveme.php
- ASTM C127-15, 2015. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM C128-15, 2015. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM C131/C131M-14, 2014. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM C88-13, 2013. *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM D113-17, 2017. *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D2041/D2041M-11, 2011. *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- ASTM D2170 / D2170M - 10, 2010. *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- ASTM D2171 / D2171M – 10, 2010. *Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- ASTM D2419-14, 2014. Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D2726/D2726M-17, 2017. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D2872-12e1, 2012. *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

- ASTM D3203/D3203M-17, 2017. *Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D3515-01, 2001. *Standard Specification for hot mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
- ASTM D3549/D3549M-17, 2017. *Standard Test Method for Thickness or Height of Compacted Asphalt Mixture Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D5 / D5M-13, 2013. *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM D6926-16, 2016. *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D6927-15, 2015. *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D70-17, 2017. *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D92-16b, 2016. *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM D36/D36M-14e1, 2014. *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- Bhatti, M. (2017). *Bituminous Mix Designs, Comparison of Marshall and Superpave Mix Design*. Netherlands.
- Bazin P, Saunier J (1967). *Deformability, fatigue, and healing properties of asphalt mixes. Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Michigan, pp 553-569.
- Chen, H., Li, N., Hu, C., & Zhang, Z., *Mechanical Performance of Fibers-Reinforced Asphalt Mixture*. J. Chang Univ., Vol. 24, No. 2, 2004, pp. 1–5.
- EcuRed. (2017). Pavimento flexible. Marzo 20, 2018, de EcuRed Sitio web: https://www.ecured.cu/Pavimento_flexible
- Garcia, A., Norambuena-Contreras, J., & Partl, M. N., *Experimental Evaluation of Dense Asphalt Concrete Properties for Induction Heating Purposes*, Constr. Build. Mater., Vol. 46, 2013, pp. 48–54

- García, A., Norambuena-Contreras, J., Bueno, M. & Manfred N.. (2014, septiembre 22). *Influence of Steel Wool Fibers on the Mechanical, Termal, and Healing Properties of Dense Asphalt Concrete*. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 42, pp.1107-1108.
- INEN 2515:2010- Enmienda 1, 2010. *Productos Derivados Del Petróleo. Cemento Asfáltico (Clasificación por Viscosidad) Requisitos*, INEN, Quito, 2010.
- Liu, Q. (2012). *Induction Healing of Porous Asphalt Concrete*. (Tesis doctoral). Universidad Técnica de Delft, Países Bajos.
- McDaniel RS, Thornton W (2005). Field evaluation of a porous friction course for noise control. TRB 2005 Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.
- National Asphalt Pavement Association. (2009). *Porous Asphalt Pavements*. Febrero 6, 2018, de NAPA Sitio web: http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&view=article&id=359&Itemid=863
- National Asphalt Pavement Association. (2009). *Warm-Mix Asphalt*. Febrero 6, 2018, de NAPA Sitio web: https://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&task=view&id=148&Itemid=329
- NEVI-12, 2012. *Norma Ecuatoriana Vial: Volumen No 3 "Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes"*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Quito, 2012.
- Padilla Rodríguez, Alejandro. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona – Enginyeria de Camins, Canals i Ports.
- Schlangen, E., Liu, Q. & Ven, MFC van de (2013). *Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 25(7), pp 880-885.
- White SR, Sottos NR, Geubelle PH, Moore JS, Kessler MR, Sriram SR, Brown EN, Viswanathan S (2001). *Autonomic healing of polymer composites*. Nature Vol. 409: pp 794-797.
- Wu, S., Ye, Q., Li, N., & Yue, H., *Effects of Fibers on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures*, J. Wuhan Univ. Technol., Vol. 22, 2007, pp. 733–73

7. ANEXOS

Informe de resultados del ensayo de Durabilidad de los áridos a la acción de los sulfatos

ÁREA DE HORMIGONES INFORME DE ENSAYO DURABILIDAD DE LOS ÁRIDOS A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS

PROYECTO:
LOCALIZACION:
MUESTRA:
NORMA ENSAYO:

SOLICITADO POR:
FISCALIZADOR:
CONTRATISTA:

CANTERA:
LOCALIZACION:
DESCRIPCIÓN:

FECHA DE RECEPCIÓN:
FECHA DE EMISIÓN:
ORDEN DE TRABAJO N°:
HOJA:

SOLUCION DE SULFATO DE MAGNESIO

Agregado Fino

Tamiz	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	% de pérdida
4	100,00	31,80	68,20
8	100,10	71,60	28,47
16	100,00	77,40	22,60
30	100,50	84,40	16,02
50	100,10	89,50	10,59

Agregado Grueso

Tamiz	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	% de pérdida
3/4	502,00	234,80	53,23
1/2	671,20	120,10	82,11
3/8	332,00	58,40	82,41
4	301,00	127,80	57,54

Informe de resultados del ensayo de Abrasión e impacto por la máquina de Los Ángeles

ÁREA DE HORMIGONES
INFORME DE ENSAYO
ABRASIÓN E IMPÁCTO POR LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

PROYECTO:

SOLICITADO POR:

LOCALIZACION:

FISCALIZACION:

MUESTRA:

CONTRATISTA:

NORMA ENSAYO:

FECHA DE RECEPCIÓN:

FECHA DE EMISIÓN:

CANtera:

LOCALIZACIÓN:

RECEPCION N°:

DESCRIPCIÓN:

HOJA:

Porcentaje de desgaste = (C / A) * 100

Masa que pasa el tamiz No. 12 = (A - B)

TIPO DE GRADACION:

B

MASA INICIAL DE LA MUESTRA

A= 5000 gr.

MASA RETENIDA EN EL TAMIZ N° 12 DESPUÉS DE
500 REVOLUCIONES

B= 2803 gr

MASA QUE PASA EL TAMIZ N° 12

C= 2197 gr

PORCENTAJE DE DESGASTE

D= 44 %

Informe de resultados del ensayo de Gravedad específica en el agregado fino

ÁREA DE HORMIGONES
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN EN EL AGREGADO FINO
PROCEDIMIENTO GRAVIMÉTRICO

PROYECTO:	SOLICITADO POR:
LOCALIZACION:	FISCALIZACION:
MUESTRA:	CONTRATISTA:
NORMA ENSAYO:	FECHA DE RECEPCIÓN:
	FECHA DE EMISIÓN:
CANTERA:	
LOCALIZACIÓN:	RECEPCION N°:
DESCRIPCIÓN:	HOJA:

$$\text{Gravedad específica seca} = A / (B + S - C)$$

$$\text{Gravedad específica saturada con superficie seca} = S / (B + S - C)$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = A / (B + A - C)$$

MASA DEL MATRAZ + AGUA	B =	658,00	gr
MASA CONJUNTO MATRAZ, AGUA Y MUESTRA	C =	966,40	gr
MASA DE MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	S =	500,00	gr
MASA DE LA MUESTRA SECA	A =	468,70	gr
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA	Ge =	2,45	
GRAVEDAD ESPECIFICA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	Ges =	2,61	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	Gea =	2,92	
PORCENTAJE DE ABSORCION	Ab =	6,7	%

Informe de resultados del ensayo de Gravedad específica en el agregado grueso

ÁREA DE HORMIGONES
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN EN EL AGREGADO GRUESO

PROYECTO:

SOLICITADO POR:

LOCALIZACION:

FISCALIZACION:

MUESTRA:

CONTRATISTA:

NORMA ENSAYO:

FECHA DE RECEPCIÓN:

FECHA DE EMISIÓN:

CANTERA:

LOCALIZACIÓN:

RECEPCION N°:

DESCRIPCIÓN:

HOJA:

Gravedad específica seca = $A / (B - C)$

Gravedad específica saturada con superficie seca = $B / (B - C)$

Gravedad específica aparente = $A / (A - C)$

MASA DE LA MUESTRA SECA	A =	4965,00	gr
MASA DE LA MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	B =	5150,00	gr
MASA APARENTE DE LA MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	C =	3122,00	gr
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA	Ge =	2,45	
GRAVEDAD ESPECIFICA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	Ges =	2,54	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	Gea =	2,69	
PORCENTAJE DE ABSORCION	Ab =	3,7	%

ÁREA DE HORMIGONES INFORME DE ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA

RECEPCION N°: 4138M
HOJA:

EQUIVALENTE DE ARENA	C	20	%
----------------------	---	----	---

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD DE ASFALTOS POR VISCOSÍMETRO CAPILAR AL VACÍO

PROYECTO: LOCALIZACIÓN: NORMA DE REFERENCIA: ASTM D2171/D2171M - 10 PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-AP-6 RECEPCIÓN N°: HOJA: 1 de 2 MUESTRA: Tomada por el cliente	SOLICITA: FISCALIZACIÓN: CONTRATISTA: FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: FECHA DE EMISIÓN: 2018-02-14
--	--

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	.....
Temperatura de ensayo (°C)	60,01
Número del viscosímetro	200
Serie del viscosímetro	K596

	Bulbo B	Bulbo C	Bulbo D	Bulbo E	Bulbo F
Constante del viscosímetro (Pa.s/s):	11,95	6,167	4,142	3,138	2,497
Tiempo de flujo (s):	59,7	124,7	186,2	-----	-----
Viscosidad (Pa.s):	713,296	768,902	771,116		

Resultado del ensayo:

Viscosidad (Pa.s)	768,902
-------------------	---------

Especificación del producto:

NTE INEN 2515:2010, Tabla 5, Grado AC-20	máximo	1000	Pa.s
--	--------	------	------

Cumplimiento con respecto a la especificación del producto:

Resultado	CUMPLE
-----------	--------

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES: Residuo RTFO

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD DE ASFALTOS POR VISCOSÍMETRO CAPILAR AL VACÍO

PROYECTO: LOCALIZACIÓN: NORMA DE REFERENCIA: ASTM D2171/D2171M - 10 PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-AP-6 RECEPCIÓN N° HOJA: 2 de 2 MUESTRA: Tomada por el cliente	SOLICITA: FISCALIZACIÓN: CONTRATISTA: FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: FECHA DE EMISIÓN: 2018-02-14
---	--

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	*****
Temperatura de ensayo (°C)	60,01
Número del viscosímetro	100
Serie del viscosímetro	L807

	Bulbo B	Bulbo C	Bulbo D	Bulbo E	Bulbo F
Constante del viscosímetro (Pa.s/s):	3,180	1,601	1,066	0,7929	0,6261
Tiempo de flujo (s):	61,5	122,3	188,8	*****	*****
Viscosidad (Pa.s):	195,443	195,866	201,229		

Resultado del ensayo:

Viscosidad (Pa.s)	195,443
-------------------	---------

Especificación del producto:

NTE INEN 2515:2010, Tabla 5, Grado AC-20	mínimo	160	Pa.s
	máximo	240	Pa.s

Cumplimiento con respecto a la especificación del producto:

Resultado	CUMPLE
-----------	--------

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES:

Informe de resultados del ensayo de Viscosidad Cinemática

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE ASFALTOS (BITÚMENES)

PROYECTO:		SOLICITA:	
LOCALIZACIÓN:		FISCALIZACIÓN:	
NORMA DE REFERENCIA:	ASTM D2170/D2170M - 10	CONTRATISTA:	
PROCEDIMIENTO:	LMC-MPT-5.4-AP-5	FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:	
RECEPCIÓN N°		FECHA DE EMISIÓN:	2018-02-14
HOJA:	1 de 2		
MUESTRA:	Tomada por el cliente		

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	.....
Temperatura de ensayo (°C)	135,00
Número del viscosímetro	7
Serie del viscosímetro	N353
Constante del viscosímetro (cSt/s)	2,952

Valores de flujo y viscosidad en la muestra:

Tiempo de flujo (s)	120,3
Viscosidad cinemática (cSt)	355

Conversión de unidades: 1 cSt = 1 mm²/s

Especificación del producto:

NTE INEN 2515:2010, Tabla 5, Grado AC-20	mínimo	300	mm ² /s
--	--------	-----	--------------------

Cumplimiento con respecto a la especificación del producto:

Resultado	CUMPLE
-----------	--------

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES:

Informe de resultados del ensayo de Punto de chispa y llama

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO DETERMINACIÓN DE PUNTO DE CHISPA Y LLAMA DE MATERIALES BITUMINOSOS CON EL EQUIPO DE COPA ABIERTA CLEVELAND

PROYECTO:

LOCALIZACIÓN:

NORMA DE REFERENCIA: ASTM D92 - 12b

PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-AP-4

RECEPCIÓN N°

HOJA: 1 de 1

MUESTRA: Tomada por el cliente

SOLICITA:

FISCALIZACIÓN:

CONTRATISTA:

FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:

FECHA DE EMISIÓN: 2018-02-14

Información del ensayo:

Identificación de la muestra	.....
Punto de Chispa (°C)	294
Punto de Llama (°C)	316
Presión barométrica (mm Hg)	549,9
Punto de Chispa corregido (°C)	301
Punto de Llama corregido (°C)	323

Especificación del producto para punto de chispa:

NTE INEN 2515:2010, Tabla 5, Grado AC-20	mínimo	232
--	--------	-----

Cumplimiento con respecto a la especificación del producto:

Resultado	CUMPLE
-----------	--------

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES:

Al momento de la recepción, se ha observado que la muestra está contaminada con polvo. Se ha comunicado este particular al cliente.

Informe de resultados del ensayo de Densidad de materiales bituminosos

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

DENSIDAD DE MATERIALES BITUMINOSOS SEMISÓLIDOS (MÉTODO DEL PICNÓMETRO)

PROYECTO:		SOLICITA:	
LOCALIZACIÓN:		FISCALIZACIÓN:	
NORMA DE REFERENCIA:	ASTM D70 - 09	CONTRATISTA:	
PROCEDIMIENTO:		FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:	
RECEPCIÓN N°		FECHA DE EMISIÓN:	2018-02-14
HOJA:	1 de 1		
MUESTRA:	Tomada por el cliente		

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	.....
Temperatura de ensayo (°C)	25,0

Registros para densidad:

Serie del picnómetro	1
(A) Masa del picnómetro (más tapa)	37,131
(B) Masa del picnómetro lleno de agua	62,382
(C) Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto	57,524
(D) Masa del picnómetro más asfalto y más agua	62,575
Densidad relativa de la muestra	1,010
Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m ³)	997,0
Densidad de la muestra (kg/m ³)	1006,526

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES:

Al momento de la recepción, se ha observado que la muestra está contaminada con polvo. Se ha comunicado este particular al cliente.

Informe de resultados del ensayo de Penetración de Materiales bituminosos

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO PENETRACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS

PROYECTO:		SOLICITA:	
LOCALIZACIÓN:		FISCALIZACIÓN:	
NORMA DE REFERENCIA:	ASTM D5/D5M - 13	CONTRATISTA:	
PROCEDIMIENTO:	LMC-MPT-5.4-AP-1	FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:	
RECEPCIÓN N°		FECHA DE EMISIÓN:	2018-02-14
HOJA:	1 de 1		
MUESTRA:	Tomada por el cliente		

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	.....
Temperatura de ensayo (°C)	25,0
Carga (g)	100,01
Tiempo de carga (s)	5

Valores de penetración en la muestra:

Punto	1	2	3	Promedio
Penetración (0,1 mm)	78	77	78	78

Especificación del producto:

NTE INEN 2515:2010, Tabla 5, Grado AC-20	mínimo	60
--	--------	----

Cumplimiento con respecto a la especificación del producto:

Resultado	CUMPLE
-----------	--------

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES:

Informe de resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO

PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE BITUMEN (APARATO DE ANILLO Y BOLA)

PROYECTO:		SOLICITA:	
LOCALIZACIÓN:		FISCALIZACIÓN:	
NORMA DE REFERENCIA:	ASTM D36/D36M - 12	CONTRATISTA:	
PROCEDIMIENTO:		FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:	
RECEPCIÓN N°		FECHA DE EMISIÓN:	2018-02-14
HOJA:	1 de 1		
MUESTRA:	Tomada por el cliente		

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	.....
Líquido usado en el baño	agua

Registros de la muestra:	Anillo 1	Anillo 2	Promedio
Punto de ablandamiento, °C	48,50	48,50	48,50

OBSERVACIONES:

Informe de resultados del ensayo de Cambio de masa (RTFO)

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
HORNO DE PELÍCULA DELGADA RODANTE

PROYECTO: LOCALIZACIÓN: NORMA DE REFERENCIA: ASTM D2872 - 12 ¹¹ PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-AP-3 RECEPCIÓN N° HOJA: 1 de 1 MUESTRA: Tomada por el cliente	SOLICITA: FISCALIZACIÓN: CONTRATISTA: FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: FECHA DE EMISIÓN: 2018-02-14
--	--

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra
------------------------------	-------

Determinación del cambio de masa:

Botella	1	2
Masa de botella + asfalto antes (g)	203,564	204,572
Masa de botella + asfalto después (g)	203,530	204,546
Cambio de masa (%)	-0,017	-0,013
Cambio de masa promedio (%)	-0,015	

Especificación del producto:

AASHTO M320, Tabla 2	máximo	1,000	%
----------------------	--------	-------	---

Cumplimiento con respecto a la especificación del producto:

Resultado	CUMPLE
-----------	--------

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES:

Informe de resultados del ensayo de Ductilidad de Materiales Bituminosos

ÁREA DE PAVIMENTOS INFORME DE ENSAYO DUCTILIDAD DE MATERIALES BITUMINOSOS

PROYECTO:		SOLICITA:	
LOCALIZACIÓN:		FISCALIZACIÓN:	
NORMA DE REFERENCIA:	ASTM D113 - 07	CONTRATISTA:	
PROCEDIMIENTO:	LMC-MPT-5.4-AP-2	FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:	
RECEPCIÓN N°		FECHA DE EMISIÓN:	2018-02-14
HOJA:	1 de 1		
MUESTRA:	Tomada por el cliente		

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	.....
Temperatura de ensayo (°C)	25,0
¿Se usa aditivo para densidad del agua?	NO
Número de réplicas	3

Valores de ductilidad en la muestra:

Molde	1	2	3	Promedio
Ductilidad (cm)	49	51	54	51
¿Ensayo normal?	SI	SI	SI	

Especificación del producto:

NTE INEN 2515:2010, Tabla 5, Grado AC-20	mínimo	50
--	--------	----

Cumplimiento con respecto a la especificación del producto:

Resultado	CUMPLE
-----------	--------

Información de la muestra:

Número de muestra	
Norma de muestreo	
Fecha de muestreo	
Origen del producto	
Lugar de muestreo	
Identificación del camión	

OBSERVACIONES: